



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Propuesta de diseño de pilares de acero inoxidable sometidos a flexo- compresión utilizando el continuous strength method

Trabajo realizado por:

Nur Esteban Shoghi Moreno

Dirigido por:

Dra. Esther Real Saladrigas

Dra. Itsaso Arrayago Luquin

Máster en:

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Barcelona, **Febrero 2020**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DECA)

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

RESUMEN

El acero inoxidable es un material con una combinación de propiedades únicas, el cual ha demostrado asegurar una resistencia y ductilidad mayor que los aceros al carbono, convirtiéndolo en una opción atractiva para el diseño de estructuras.

En la actualidad el diseño de acero inoxidable se ha realizado a través de las especificaciones del código EN1993-1-4, cuyas expresiones pueden llegar a ser poco precisas, debido a que se basan en la teoría del comportamiento del acero al carbono y desprecian el comportamiento real del acero inoxidable. Por lo tanto, es imprescindible estudiar la exactitud de las propuestas codificadas y desarrollar métodos de cálculo más precisos.

En los últimos tiempos, la comunidad científica ha invertido recursos para ampliar los conocimientos, que permitan determinar con mayor exactitud el comportamiento del acero inoxidable, uno de los métodos implementados es el continuous strength method (CSM), el cual permite predecir con exactitud la capacidad de resistencia de los perfiles de acero inoxidable, a través de la consideración del endurecimiento por deformación durante el proceso de fabricación o servicio del elemento. Sin embargo, todavía existen diversas áreas inexploradas, como es el comportamiento de los elementos de acero inoxidable frente a fenómenos de inestabilidad, donde los estudios a pandeo resultan ser muy recientes y todavía no existe una metodología clara para determinar el comportamiento a carga combinada.

En el presente estudio se analiza el comportamiento de perfiles de acero inoxidable de sección hueca rectangular, ante el efecto de una carga combinada de flexión y compresión, basados en estudios paramétricos por modelos de elementos finitos y resultados obtenidos en estudios extraídos de la literatura. Los resultados obtenidos se comparan con las capacidades resistentes establecidas en el código EN 1993-1-4 y el manual de diseño para el acero inoxidable estructural cuarta edición. El objetivo es lograr establecer las deficiencias de los métodos actuales para la predicción de la resistencia al pandeo por flexión, con una carga combinada de flexión más compresión y proponer un método que permita una predicción más exacta y real.

En esta investigación se demuestra, que la utilización del continuous strength method (CSM) en la interacción de carga axial más momento flector, proporciona resultados más reales y exactos con respecto a las predicciones del código EN1993-1-4, la razón principal es porque el CSM considera el efecto beneficioso del endurecimiento por deformación presente en los elementos de acero inoxidable.

ABSTRACT

Stainless steel is a material with a combination of unique properties, which has been shown to ensure greater strength and ductility than carbon steels. This considerations make it an attractive option for the design of structures.

Currently, stainless steel design has been carried out through the specifications of EN1993-1-4 code, whose expressions may become inaccurate, because they are based on the theory of carbon steel behavior and disregard the real behavior of stainless steel. Therefore, it is essential to study the accuracy of the codified proposals and develop more precise calculation methods.

Recently, during last decades the scientific community has invested resources to expand knowledge, which allows to determine more accurately the behavior of stainless steel. One of the implemented methods is the continuous strength method (CSM), which allows to accurately predict the resistance capacity of stainless steel profiles, through the consideration of strain hardening during manufacturing process or service of the element. However, there are still several unexplored áreas. For instance, the behavior of stainless steel elements in the face of instability phenomena, where buckling studies turn out to be very recent, and there is still no clear methodology to determine the behavior at combined load.

In the present study, the behavior of stainless steel profiles with rectangular hollow sections is analyzed, considering the effect of a combined bending and compression load. This is based on parametric studies by finite element models and results obtained in researches extracted from the literature. The results obtained will be compared with the resistance capacities established in the code EN 1993-1-4 and the design manual for structural stainless steel. The objective is to identify deficiencies of the current methods for prediction of resistance to bending buckling through a combined bending load plus compression and propose a method that allows greater accuracy and real prediction.

This research shows that the use of continuous strength method (CSM) in the interaction of axial load plus bending moment, provides more real and accurate results with respect to the predictions of the code EN1993-1-4. The main reason is that the CSM considers the beneficial effect of strain hardening presented in stainless steel elements.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento se dirige a Dios, quien es la luz que guía mi camino, mi fortaleza y respaldo en todos los momentos de mi vida.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a mis tutoras la Dra. Esther Real y la Dra. Itsaso Arrayago, quienes me han permitido desarrollar este proyecto de tesis, me han transmitido sus conocimientos y su pasión por la investigación.

Finalmente agradezco a toda mi familia por todo su apoyo, en especial a mis Padres, Lami y mi Esposa.

Este Trabajo Final de Máster lo dedico a mi primo Jorge Luis Rodríguez, quien me ha brindado su apoyo incondicional y ha sido mi ejemplo a seguir.

CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
AGRADECIMIENTOS	3
LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE FIGURAS	8
1 INTRODUCCIÓN	10
1.1 ANTECEDENTES	10
1.2 OBJETIVO	10
1.2.1 Objetivos generales	10
1.2.2 Objetivos específicos	11
1.3 DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO	11
2 ESTADO DE ARTE	13
2.1 ACERO INOXIDABLE	13
2.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO INOXIDABLE	15
2.3 COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS SOMETIDOS A COMPRESIÓN	17
2.3.1 Clasificación de las secciones huecas rectangulares	17
2.3.2 Especificaciones del código EN1993-1-4	18
2.3.3 Especificaciones del manual de diseño para acero inoxidable	19
2.4 COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS SOMETIDOS A CARGA COMBINADA	19
2.4.1 Especificaciones del código EN1993-1-4	19
2.4.2 Especificaciones del manual de diseño para acero inoxidable	21
2.5 MÉTODO DE LA RESISTENCIA CONTINUA (CONTINUOUS STRENGTH METHOD CSM)	21
2.5.1 Resistencia de la sección a compresión	23
2.5.2 Resistencia de la sección a flexión	23
2.5.3 Resistencia de la sección a carga combinada de compresión y flexión	24
2.5.4 Nuevo estudio para el cálculo del pandeo a flexión Nb, csm	25
2.6 PROPUESTAS CON EL CONTINUOUS STRENGTH METHOD (CSM)	26
2.6.1 Estudio de la interacción con el momento resistente CSM	26
2.6.2 Estudio de la interacción con el momento resistente y el pandeo por flexión CSM	27
2.7 INFORMACIÓN CORRESPONDIENTE A ESTUDIOS EXPERIMENTALES ADICIONALES	27
3 MODELO NUMÉRICO	29
3.1 INTRODUCCIÓN	29
3.2 ELEMENTOS FINITOS	29
3.3 DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO	29
3.3.1 Propiedades del material	30
3.3.2 Imperfecciones geométricas globales	32
3.4 ANÁLISIS EN EL PROGRAMA ABAQUS	33
3.4.1 Criterios generales de los modelos	33
3.4.2 Análisis de convergencia de malla	35
3.5 COMPARACIÓN DE PRUEBAS EXPERIMENTALES	37
3.6 CONCLUSIONES	39
4 ESTUDIO PARAMÉTRICO	40

4.1	INTRODUCCIÓN	40
4.2	DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO PARAMÉTRICO	40
4.3	DEFINICIÓN DEL ESTUDIO PARAMÉTRICO	40
4.3.1	Propiedades geométricas	40
4.3.2	Propiedades mecánicas	42
4.3.3	Imperfecciones geométricas	45
4.4	DESARROLLO DE MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS	46
4.5	CONCLUSIONES	56
5	ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL PANDEO POR FLEXIÓN CON EL CSM	57
5.1	INTRODUCCIÓN	57
5.2	RESULTADOS ELEMENTOS CONCÉNTRICOS	57
5.3	RESULTADOS ELEMENTOS EXCÉNTRICOS	59
5.4	CONCLUSIONES	74
6	RESULTADOS DEL ESTUDIO PARAMÉTRICO Y PRESENTACIÓN DE NUEVA PROPUESTA	75
6.1	INTRODUCCIÓN	75
6.2	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS	75
6.2.1	Comparación de los resultados del acero inoxidable austenítico	76
6.2.2	Comparación de los resultados del acero inoxidable dúplex	82
6.2.3	Comparación de los resultados del acero inoxidable ferríticos	88
6.3	PRESENTACIÓN DE NUEVA PROPUESTA	94
6.3.1	Comparación de los resultados con la nueva propuesta para el factor de interacción	103
6.4	VALIDACIÓN ESTADÍSTICA	104
6.5	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	112
6.6	CONCLUSIONES	115
7	CONCLUSIONES	117
7.1	SUGERENCIAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES	118
8	REFERENCIAS	119
ANEXOS		122

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de secciones a compresión y flexión [8].	18
Tabla 2 Valores de D1, D2, y D3, para la interacción [1].	21
Tabla 3 Propuesta de coeficientes C5 y C6 para diferentes aceros inoxidables [12].	25
Tabla 4 Estudios experimentales adicionales	28
Tabla 5 Propiedades mecánicas del material presentadas por el fabricante [22].	30
Tabla 6 Resultados de las pruebas de tracción de las muestras extraídas de las secciones [22].	30
Tabla 7 Propiedades promedios de las secciones transversales [22].	32
Tabla 8 Dimensiones de las secciones ensayadas [22].	33
Tabla 9 Resultados obtenidos del análisis de convergencia (Carga crítica de Euler).	35
Tabla 10 Resultados obtenidos del análisis de convergencia (Carga última).	35
Tabla 11 Comparación del estudio numérico y experimental.	38
Tabla 12 Propiedades geométricas de los elementos a carga concéntrica	41
Tabla 13 Propiedades mecánicas del acero inoxidable austenítico [27].	42
Tabla 14 Propiedades mecánicas del acero inoxidable dúplex [27].	43
Tabla 15 Propiedades mecánicas del acero inoxidable ferrítico [27].	43
Tabla 16 Propiedades mecánicas promedio del acero inoxidable austenítico.	44
Tabla 17 Propiedades mecánicas promedio del acero inoxidable dúplex.	44
Tabla 18 Propiedades mecánicas promedio del acero inoxidable ferrítico.	45
Tabla 19 Imperfecciones geométricas de los elementos	45
Tabla 20 Resultados del análisis de elementos finitos (austeníticos).	46
Tabla 21 Resultados del análisis de elementos finitos (dúplex).	47
Tabla 22 Resultados del análisis de elementos finitos (ferrítico).	49
Tabla 23 Resultados modelos concéntricos (austeníticos).	58
Tabla 24 Resultados modelos concéntricos (dúplex).	58
Tabla 25 Resultados modelos concéntricos (ferríticos).	59
Tabla 26 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X3 austeníticos).	60
Tabla 27 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X3.5 austeníticos).	60
Tabla 28 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X3.5 austeníticos).	61
Tabla 29 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X4 austeníticos).	61
Tabla 30 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X4.5 austeníticos).	62
Tabla 31 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X3 dúplex).	62
Tabla 32 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X3 dúplex).	63
Tabla 33 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X3.5 dúplex).	63
Tabla 34 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X4 dúplex).	64
Tabla 35 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X4.5 dúplex).	64
Tabla 36 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X4.5 dúplex).	65
Tabla 37 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X3 ferrítico).	65
Tabla 38 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X3.5 ferrítico).	66
Tabla 39 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X4 ferrítico).	66
Tabla 40 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X4 ferrítico).	67
Tabla 41 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X4.5 ferrítico).	67
Tabla 42 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X3 austenítico).	76
Tabla 43 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X3.5 austenítico).	77
Tabla 44 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X4 austenítico).	78
Tabla 45 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X4.5 austenítico).	79

Tabla 46 Comparación de las resistencias obtenidas de la literatura (austenítico).	80
Tabla 47 Media y coeficiente de variación (austenítico).	80
Tabla 48 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X3 dúplex).	82
Tabla 49 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X3.5 dúplex).	83
Tabla 50 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X4 dúplex).	84
Tabla 51 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X4.5 dúplex).	85
Tabla 52 Comparación de las resistencias obtenidas de la literatura (dúplex).	86
Tabla 53 Media y coeficiente de variación (dúplex).	86
Tabla 54 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X 3 ferrítico).	88
Tabla 55 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X 3.5 ferrítico).	89
Tabla 56 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X4 ferrítico).	90
Tabla 57 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X 4.5 ferrítico).	91
Tabla 58 Comparación de las resistencias obtenidas de la literatura (ferrítico).	92
Tabla 59 Media y coeficiente de variación (ferrítico).	92
Tabla 60 Nueva propuesta de coeficientes para diferentes acero inoxidable.	94
Tabla 61 Medias y coeficientes de variación de las propuestas (austeníticos, dúplex y ferríticos).	104
Tabla 62 Resumen de validación estadística acero inoxidable austenítico	104
Tabla 63 Resumen de validación estadística acero inoxidable dúplex.	107
Tabla 64 Resumen de validación estadística acero inoxidable ferrítico.	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Contenido de cromo y níquel en el acero inoxidable [2].	13
Figura 2	Comparación del costo total del acero al carbono con el acero inoxidable [3].	14
Figura 3	Puente Hélix Bridge – Singapur.	14
Figura 4	Límite de elasticidad del acero inoxidable [1].	15
Figura 5	Comportamiento tensión - deformación del acero inoxidable [1].	16
Figura 6	Modelo del material para el CSM [1].	22
Figura 7	Elementos a pandeo por flexión por tipo de familia y tipo de sección (estudios adicionales).	28
Figura 8	Comportamiento en las regiones de la sección 80X80X4	31
Figura 9	Comportamiento en las regiones de la sección 60X60X3.	31
Figura 10	Comportamiento en las regiones de la sección 80X40X4.	32
Figura 11	Resultados del análisis de convergencia de malla (Ncr vs número de elementos).	36
Figura 12	Resultados del análisis de convergencia de malla (Carga axial vs Desplazamiento lateral).	36
Figura 13	Diferencia de magnitudes en la convergencia de malla (Carga axial vs Desplazamiento lateral).	36
Figura 14	Comparación modelo numérico con el modelo experimental (S1-80X80X4).	37
Figura 15	Comparación modelo numérico con el modelo experimental (S2-60X60X3).	37
Figura 16	Comparación modelo numérico con el modelo experimental (S3-80X40X4).	38
Figura 17	Definición de símbolos para las propiedades geométricas y mecánicas de las secciones.	41
Figura 18	Comportamiento en las regiones de la sección transversal del acero inoxidable austenítico.	43
Figura 19	Comportamiento en las regiones de la sección transversal del acero inoxidable dúplex.	43
Figura 20	Comportamiento en las regiones de la sección transversal del acero ferrítico.	44
Figura 21	Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S1-A austeníticos).	50
Figura 22	Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S2-A austeníticos).	51
Figura 23	Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S3-A austeníticos).	51
Figura 24	Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S4-A austeníticos).	52
Figura 25	Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z1-A dúplex).	52
Figura 26	Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z2-A dúplex).	53
Figura 27	Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z3-A dúplex).	53
Figura 28	Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z4-A dúplex).	54
Figura 29	Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F1-A ferrítico).	54
Figura 30	Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F2-A ferrítico).	55
Figura 31	Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F3-A ferrítico).	55
Figura 32	Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F4-A ferrítico).	56
Figura 33	Curva de interacción (SHS60X60X3 austenítico).	68
Figura 34	Curva de interacción (SHS60X60X3.5 austenítico).	69
Figura 35	Curva de interacción (SHS60X60X4 austenítico).	69
Figura 36	Curva de interacción (SHS60X60X4.5 austenítico).	70
Figura 37	Curva de interacción (SHS60X60X3 dúplex).	70
Figura 38	Curva de interacción (SHS60X60X3.5 dúplex).	71
Figura 39	Curva de interacción (SHS60X60X4 dúplex).	71
Figura 40	Curva de interacción (SHS60X60X4.5 dúplex).	72
Figura 41	Curva de interacción (SHS60X60X3 ferrítico).	72
Figura 42	Curva de interacción (SHS60X60X3.5 ferrítico).	73
Figura 43	Curva de interacción (SHS60X60X4 ferrítico).	73
Figura 44	Curva de interacción (SHS60X60X4.5 ferrítico).	74
Figura 45	Definición del ángulo θ .	75

Figura 46	Comparación de los resultados con el código EN1993-1-4 (austenítico).	81
Figura 47	Comparación de los resultados con la propuesta O. Zhao (austenítico).	81
Figura 48	Comparación de los resultados con la propuesta de tesis CSM (austenítico).	81
Figura 49	Comparación de los resultados con el código EN1993-1-4 (dúplex).	87
Figura 50	Comparación de los resultados con la propuesta O. CSM (dúplex).	87
Figura 51	Comparación de los resultados con la propuesta de tesis CSM (dúplex).	87
Figura 52	Comparación de los resultados con el código EN1993-1-4 (ferríticos).	93
Figura 53	Comparación de los resultados con la propuesta O. Zhao (ferríticos).	93
Figura 54	Comparación de los resultados con la propuesta de tesis CSM (ferríticos).	93
Figura 55	Comparación del factor de interacción de las propuestas y EF (SHS 60X60X4 – austenítico).	95
Figura 56	Comparación del factor de interacción de las propuestas y EF (SHS 60X60X4 – dúplex).	96
Figura 57	Comparación del factor de interacción de las propuestas y EF (SHS 60X60X4 – ferrítico).	96
Figura 58	Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X3 – austenítico).	97
Figura 59	Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X3.5 – austenítico).	97
Figura 60	Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X4 – austenítico).	98
Figura 61	Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X4.5 – austenítico).	98
Figura 62	Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X3 – dúplex).	99
Figura 63	Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X3.5 – dúplex).	99
Figura 64	Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X4 – dúplex).	100
Figura 65	Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X4.5 – dúplex).	100
Figura 66	Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X3– ferrítico).	101
Figura 67	Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X3.5– ferrítico).	101
Figura 68	Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X4– ferrítico).	102
Figura 69	Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X4.5– ferrítico).	102
Figura 70	Comparación de los resultados con la nueva propuesta CSM (austeníticos).	103
Figura 71	Comparación de los resultados con la nueva propuesta CSM (dúplex).	103
Figura 72	Comparación de los resultados con la nueva propuesta CSM (ferríticos).	103
Figura 73	Estudio de validación estadística con la propuesta del nuevo factor (austeníticos).	105
Figura 74	Estudio de validación estadística con la propuesta de tesis (austeníticos).	105
Figura 75	Estudio de validación estadística con la propuesta de O. Zhao (austeníticos).	106
Figura 76	Estudio de validación estadística con el código EN1993-1-4 (austeníticos).	106
Figura 77	Estudio de validación estadística con la propuesta del nuevo factor (dúplex).	107
Figura 78	Estudio de validación estadística con la propuesta de tesis (dúplex).	108
Figura 79	Estudio de validación estadística con la propuesta de O. Zhao (dúplex).	108
Figura 80	Estudio de validación estadística con el código EN1993-1-4 (dúplex).	109
Figura 81	Estudio de validación estadística con la propuesta del nuevo factor (ferrítico).	110
Figura 82	Estudio de validación estadística con la propuesta de tesis (ferrítico).	110
Figura 83	Estudio de validación estadística con la propuesta de O. Zhao (ferrítico).	111
Figura 84	Estudio de validación estadística con el código EN1993-1-4 (ferrítico).	111
Figura 85	Evaluación de los resultados del código EN1993-1-4 y la propuesta O. Zhao (austenítico)	112
Figura 86	Evaluación de los resultados de las propuestas de tesis (austenítico).	113
Figura 87	Evaluación de los resultados del código EN1993-1-4 y la propuesta O. Zhao (dúplex)	113
Figura 88	Evaluación de los resultados de las propuestas de tesis (dúplex).	113
Figura 89	Evaluación de los resultados del código EN1993-1-4 y la propuesta O. Zhao (ferrítico)	114
Figura 90	Evaluación de los resultados de las propuestas de tesis (ferrítico).	114

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El acero inoxidable es una aleación del cromo, el níquel, el molibdeno, el manganeso, el titanio y el cobre. El compuesto fundamental es el cromo, el mismo que debe tener una concentración superior al 10.5% para proporcionar una resistencia considerable ante la corrosión y a altas temperaturas.

El cromo crea una película pasiva autorreparable protectora en el perfil estructural, la cual se regenera de manera automática al contacto con el oxígeno, si es dañada. La eficiencia de esta película pasiva depende de la composición del acero inoxidable, el tratamiento superficial y la corrosividad del entorno.

Los aceros inoxidables se han clasificado en función del contenido de cada uno de sus compuestos, los cuales proporcionan propiedades específicas y diferentes capacidades de resistencia a la corrosión.

Las expresiones de los diseños tradicionales corresponden al comportamiento del acero al carbono, cuyas expresiones tienden a ser muy conservadoras, por lo cual no se manifiesta la eficiencia en el diseño de elementos con acero inoxidable. Uno de los métodos que proporciona una predicción de resistencia más exacta es el continuous strength method (CSM), el cual se basa en el comportamiento tenso-deformación no lineal del material y el criterio del endurecimiento por deformación. La importancia del continuous strength method (CSM), radica en la predicción más exacta del comportamiento de elementos de acero inoxidable, lo que se traduce en un diseño eficiente.

1.2 Objetivo

El objetivo del presente estudio es conocer y predecir el comportamiento de perfiles de acero inoxidable de sección hueca rectangular, ante carga combinada de compresión más flexión, basándose en estudios de modelos numéricos desarrollados con las herramientas de elementos finitos y validados por estudios experimentales.

Los objetivos se dividen en generales y específicos.

1.2.1 Objetivos generales

Las secciones huecas rectangulares de acero inoxidable son las secciones más utilizadas como elementos estructurales para conformar columnas, debido a su capacidad de resistencia superior,

la durabilidad y la estética, sin embargo, los perfiles de acero inoxidable poseen un costo superior al acero al carbono, por lo tanto, la eficiencia en la utilización del acero inoxidable radica en establecer criterios de cálculo que permitan aprovechar todas las propiedades del acero inoxidable.

Este trabajo consiste en estudiar el comportamiento de elementos de acero inoxidable sometidos a carga combinada de compresión más flexión, donde se estudian los diferentes métodos de cálculo para la resistencia al pandeo por flexión, con la finalidad de determinar el método más eficiente y real.

1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este proyecto son los siguientes:

- Estudiar la capacidad de los elementos de sección hueca rectangular de acero inoxidable, frente a carga combinada de flexión más compresión, considerando ensayos de laboratorio, expresiones codificadas en el código EN1993-1-4 y el manual de diseño de acero inoxidable estructural cuarta edición.
- Estudiar y evaluar los métodos alternativos para el diseño de elementos de acero inoxidable sometidos a carga combinada de flexión más compresión.
- Determinar el método de diseño más eficiente para predecir la capacidad de resistencia a carga combinada de flexión más compresión en secciones huecas rectangulares y proponer una metodología que permita satisfacer las deficiencias actuales.

1.3 Descripción del contenido

La descripción del contenido de esta investigación se explica a continuación:

1. Estado del arte: Contiene conceptos fundamentales del acero inoxidable, sus principales beneficios y sus aplicaciones en la industria de la construcción, se presentan las especificaciones de cálculo establecidas en el código EN1993-1-4, las propuestas de cálculo del manual de diseño de acero inoxidable estructural, las nuevas propuestas de cálculo para determinar la resistencia a pandeo por flexión, la interacción ante carga combinada de compresión más flexión y se exponen los ensayos o estudios experimentales obtenidos de la literatura.
2. Estudio numérico: Describe el proceso de análisis de un modelo numérico, a través del programa de uso general Abaqus, cuyo estudio permitirá realizar la calibración del modelo numérico para iniciar un estudio paramétrico.

3. Estudio paramétrico: Contiene la descripción del procedimiento específico para desarrollar un estudio paramétrico y se aborda una investigación numérica sobre el comportamiento del pandeo por flexión en miembros de columnas de sección hueca rectangular (SHS - RHS), sometidos a una carga axial y momento flector uniforme.
4. Estudio de la resistencia al pandeo por flexión con el CSM: Contiene una explicación del procedimiento de cálculo para obtener la resistencia al pandeo por flexión en perfiles de sección hueca rectangular utilizando el continuous strength method (CSM) y las expresiones del código EN1993-1-4, se exponen los resultados de las resistencias al pandeo por flexión de los elementos sometidos a carga de compresión pura y carga combinada de compresión más flexión con la propuesta de tesis y los métodos tradicionales, se representan las curvas de interacción de cada propuesta de cálculo.
5. Resultados del estudio paramétrico y presentación de nueva propuesta: Contiene una comparación de los resultados numéricos con las expresiones codificadas y por los métodos alternativos, se expone una nueva propuesta de cálculo para la predicción de la resistencia al pandeo por flexión, considerando un factor de interacción general para los tres tipos de aceros inoxidables más comunes, se determina el método más eficiente para la predicción de la capacidad de resistencia a carga combinada de compresión más flexión.
6. Conclusiones: Contiene comentarios generales, basados en el análisis de los resultados del estudio paramétrico con las expresiones codificadas y los métodos alternativos considerando el continuous strength method CSM, además se hacen recomendaciones para investigaciones futuras.

2 ESTADO DE ARTE

En este capítulo se presentan los conceptos más relevantes del estudio del acero inoxidable, seguido de una descripción de las normas de diseño para estructuras de acero inoxidable y los estudios más importantes sobre pilares de secciones huecas rectangulares, sometidos a carga combinada de compresión y flexión.

2.1 Acero inoxidable

El acero inoxidable es un material compuesto por el cromo, el níquel, el molibdeno, el manganeso, el titanio y el cobre. El compuesto más importante es el cromo, el cual debe tener una proporción mínima del 10.5% de la masa, que es la clave de la resistencia a la corrosión. Cuando se expone el cromo al aire se forma una capa de óxido de cromo (Cr_2O_3) pasiva y autorreparable en la superficie del elemento, el mismo que llega a ser impermeable al aire y al agua.

La proporción de cada uno de los compuestos, ha definido diferentes tipos de aceros inoxidables, los que comunmente se agrupan en cinco tipos principales de acuerdo con su estructura metalúrgica, los que son: austenítico, ferrítico, dúplex, martensítico y endurecimiento por precipitación [1].

En la Figura 1 se muestra una visión general de la relación con el contenido de cromo y níquel.

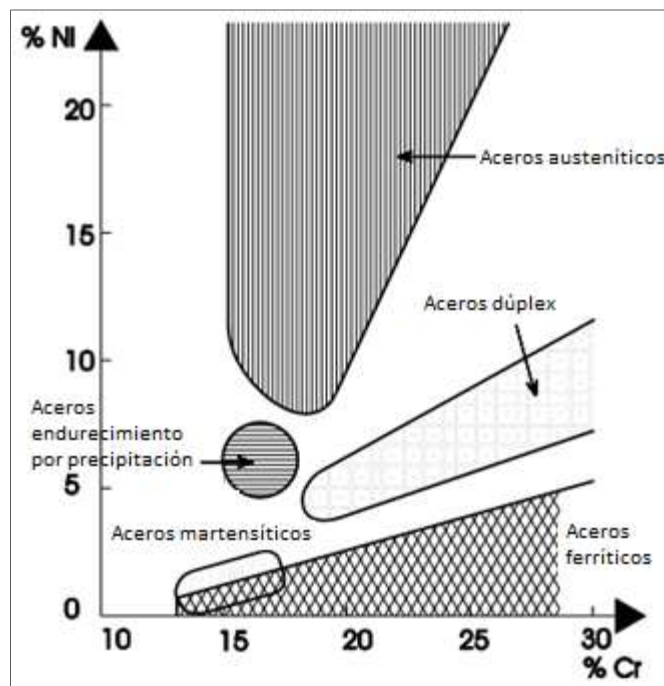


Figura 1 Contenido de cromo y níquel en el acero inoxidable [2].

Los aceros inoxidable contienen cantidades de elementos costosos como el níquel o el cromo, los cuales superan cinco veces el costo de los elementos del acero al carbono. Sin embargo, el costo de los materiales representa solo un costo parcial del costo total de la estructura, el ahorro en la utilización del acero inoxidable radica principalmente en los costos de mantenimiento durante su vida útil. En la Figura 2 se muestra la relación costo de operación frente al costo del material del acero al carbono, el acero inoxidable con un diseño tradicional y el acero inoxidable con un diseño eficiente.

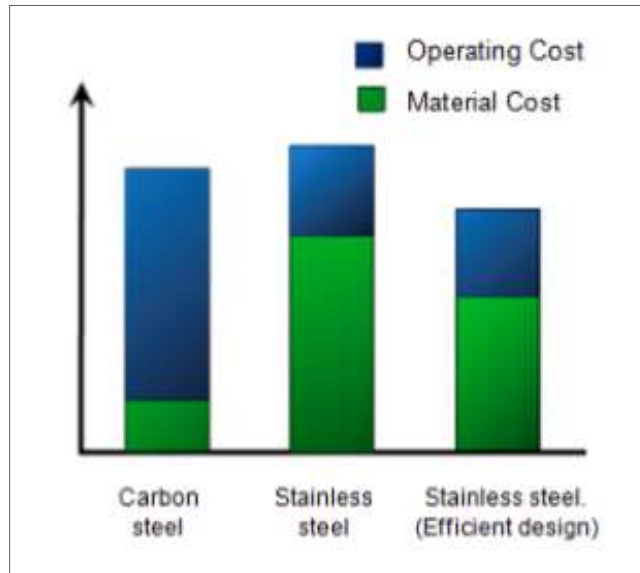


Figura 2 Comparación del costo total del acero al carbono con el acero inoxidable [3].

El acero inoxidable presenta múltiples beneficios, algunos de los cuales son visibles como la funcionalidad y la estética, características que han sido utilizadas para la construcción de obras públicas como puentes, consideradas verdaderas obras de arte.



Figura 3 Puente Hélix Bridge – Singapur.

Otro aspecto importante en la utilización de los aceros inoxidables es la gran capacidad de reciclaje. Se considera que puede reciclarse entre un 50% y un 80%, porcentaje que no se alcanza con la mayoría de los demás materiales, la razón es que el acero inoxidable contiene elementos que son muy valiosos, los cuales se pueden vender fácilmente; además el acero inoxidable no tiene ningún efecto sobre el medio ambiente, debido a su resistencia a la corrosión [2].

2.2 Propiedades mecánicas del acero inoxidable

El acero al carbono exhibe un comportamiento lineal hasta su límite elástico y una zona plana antes del endurecimiento por deformación, lo cual permite tener un límite elástico fácilmente identificable. Por el contrario, el comportamiento del acero inoxidable se caracteriza por la forma de la curva tensión-deformación, lo que significa que el acero inoxidable no posee un límite elástico claramente definido. Se asume un límite elástico en función a una deformación remanente del 0.2%, tal como se muestra en la Figura 4.

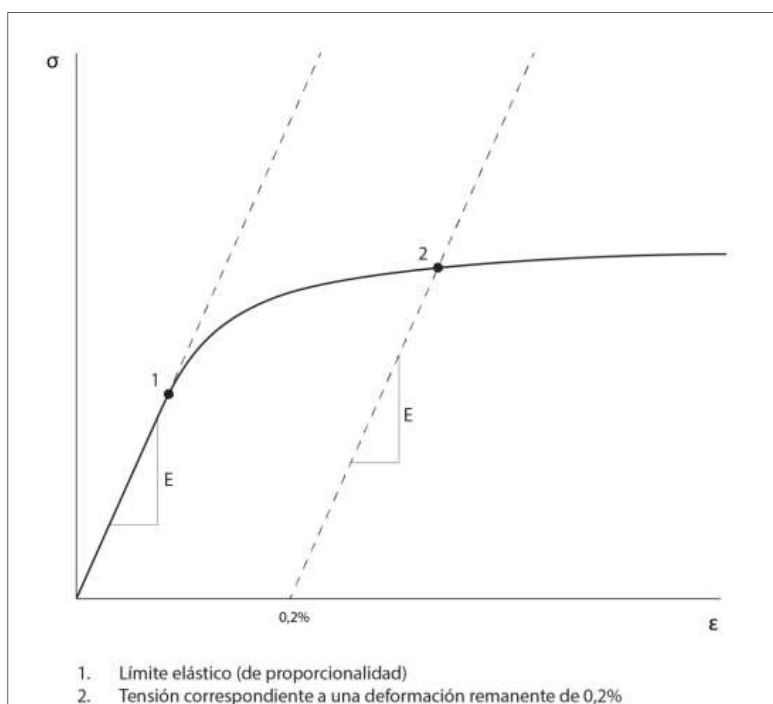


Figura 4 Límite de elasticidad del acero inoxidable [1].

Existe una variedad de aceros inoxidables, los cuales poseen características de resistencia mecánica diferentes, estas características dependen de las proporciones de los elementos que los conforman, los cuales son: cromo, níquel, molibdeno, manganeso, titanio y cobre. Las tres principales familias son: austenítico, ferrítico y dúplex. En la Figura 5 se muestra la respuesta de tensión– deformación del acero inoxidable.

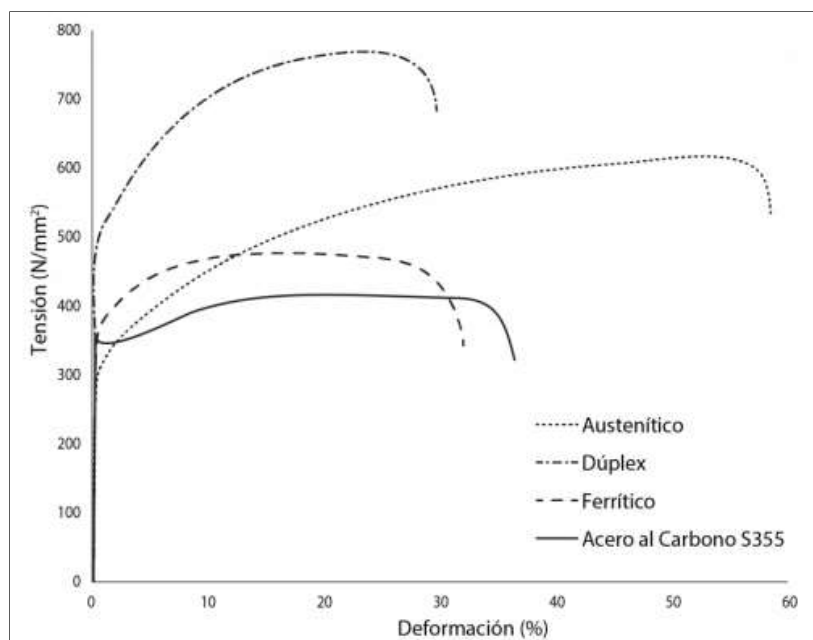


Figura 5 Comportamiento tensión - deformación del acero inoxidable [1].

El comportamiento redondeado del diagrama tensión – deformación del acero inoxidable puede representarse analíticamente mediante diferentes modelos de materiales. El más común se basa en la formulación de Ramberg – Osgood [4] y modificada por Hill [5] ecuación (2.1). Las tensiones en el esfuerzo final, la ductilidad y el grado redondeado de la curva tensión – deformación, varían de acuerdo a los grados o tipos de aceros inoxidables.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{f_y} \right)^n \quad \text{para } \sigma \leq f_y \quad (2.1)$$

Donde σ es la tensión normal, E es el módulo de elasticidad, f_y es el límite elástico para una deformación del 0.2%, n es el exponente de endurecimiento por deformación que define el grado redondeado de la curva, ecuación (2.2).

$$n = \frac{\ln(4)}{\ln\left(\frac{f_y}{\sigma_{0.05}}\right)} \quad (2.2)$$

Donde $\sigma_{0.05}$ es la tensión correspondiente a una deformación del 0.05%.

La expresión de Ramberg – Osgood ecuación (2.1) puede representar varias secciones de la curva tensión-deformación, pero con el uso de varios valores del factor de endurecimiento “ n ”, el cual es incapaz de proporcionar una representación continua de la curva tensión-deformación del acero inoxidable, desde el inicio de la carga hasta la tensión final. Se han desarrollado expresiones que permiten calcular la gráfica en dos etapas como es la propuesta por Mirambell – Real [6], la ecuación (2.1) representa la gráfica hasta la deformación del 0.2%, y la ecuación (2.3) representa la gráfica tensión - deformación a partir de la deformación del 0.2%.

$$\varepsilon = \frac{\sigma - f_y}{E_{0.2}} + \left(\varepsilon_u - \varepsilon_{0.2} - \frac{f_u - f_y}{E_{0.2}} \right) \left(\frac{\sigma - f_y}{f_u - f_y} \right)^m + \varepsilon_{0.2} \text{ para } \sigma > f_y \quad (2.3)$$

Donde $E_{0.2}$ es el módulo tangente a una deformación remanente del 0.2% ecuación (2.4), f_u es la tensión última, $\varepsilon_{0.2}$ es la deformación remanente correspondiente al 0.2%, m es el segundo exponente de endurecimiento por deformación ecuación (2.6) y ε_u es la deformación última ecuación (2.7a-2.7b).

$$E_{0.2} = \frac{E}{1 + 0.002n \frac{E}{f_y}} \quad (2.4)$$

Posterior a la propuesta Mirambell - Real, se desarrolló una versión simplificada de la ecuación (2.3), señalando que la fórmula es aplicable para materiales dúctiles ecuación (2.5) [7].

$$\varepsilon = 0.002 + \frac{f_y}{E} + \frac{\sigma - f_y}{E_{0.2}} + \varepsilon_u \left(\frac{\sigma - f_y}{f_u - f_y} \right)^m \text{ para } \sigma > f_y \quad (2.5)$$

$$m = 1 + 2.8 \frac{f_y}{f_u} \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u} \text{ para acero inoxidable austenítico y dúplex} \quad (2.7a)$$

$$\varepsilon_u = 0.6 \left(1 - \frac{f_y}{f_u} \right) \text{ para acero inoxidable ferrítico} \quad (2.7b)$$

2.3 Comportamiento de elementos sometidos a compresión

2.3.1 Clasificación de las secciones huecas rectangulares

Al igual que el acero al carbono, el pandeo local y la capacidad máxima de las secciones transversales del acero inoxidable, depende de la clasificación de la sección transversal. Cada sección se clasifica de acuerdo a la esbeltez de las partes comprimidas de la sección transversal. El procedimiento para determinar la clase de sección transversal consiste en determinar las propiedades mecánicas del material como el límite elástico, el módulo de Young y el tipo de carga al que se ve sometido el elemento que puede ser: compresión pura, flexión pura, o carga combinada de flexión más compresión.

Existen cuatro clases, las cuales son: las secciones clase 1 que son secciones transversales en las que se puede formar una rótula plástica con la capacidad de rotación requerida para un análisis plástico, las secciones clase 2 que son secciones transversales en las que se puede alcanzar el momento plástico, pero poseen una capacidad de rotación menor a las secciones clase 1, las secciones clase 3 que son secciones transversales en las que la tensión en la fibra más comprimida de la pieza puede alcanzar el límite elástico, pero la abolladura impide alcanzar el momento plástico, y las secciones clase 4 que son secciones transversales en las que la abolladura ocurre antes de que se alcance la tensión de límite elástico en una o más partes de la sección [1].

La clasificación de las secciones se basa en la relación ancho - espesor b/c , las propiedades del material corresponden al límite elástico, las cuales para el acero inoxidable será la correspondiente al esfuerzo de deformación del 0.2% y la tensión de deformación ε , ecuación (2.8).

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0.5} \quad (2.8)$$

Los límites para la clasificación de los elementos de acero inoxidable son diferentes con respecto del acero al carbono. Algunos trabajos de investigación han determinado que estos pueden ser muy conservadores [8]. En la Tabla 1 se muestran los límites establecidos en los códigos EN1993-1-1, EN1993-1-4 y el manual de diseño de acero inoxidable.

Tabla 1 Clasificación de secciones a compresión y flexión [8].

Clase	Elementos sometido a compresión	Elemento sometido a flexión	Tipo
1	33ε	72ε	EN1993-1-1
	25.7ε	56ε	EN1993-1-4 (2006)
	33ε	72ε	Manual de diseño de acero inoxidable
2	38ε	83ε	EN1993-1-1
	26.7ε	58.2ε	EN1993-1-4 (2006)
	35ε	76ε	Manual de diseño de acero inoxidable
3	42ε	124ε	EN1993-1-1
	30.7ε	74.8ε	EN1993-1-4 (2006)
	37ε	90ε	Manual de diseño de acero inoxidable

2.3.2 Especificaciones del código EN1993-1-4

Los métodos tradicionales de resistencia de los elementos de columnas, están basados en la formulación de Ayrton – Perry establecida en el código EN1993-1-4 [9]. Esta fórmula consiste en reducir la resistencia de la sección transversal debido a los efectos del pandeo por flexión.

Para elementos de acero inoxidable se establece la fórmula de acuerdo a la ecuación (2.12), donde el factor de imperfección y el límite de esbeltez adimensional son $\alpha = 0.49$, $\bar{\lambda}_0 = 0.40$ para secciones conformadas en frío.

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} < 1 \quad (2.9)$$

$$\phi = 0.5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) \quad (2.10)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (2.11)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (2.12)$$

Donde N_{cr} es el esfuerzo axial crítico de pandeo del modo correspondiente determinado en función de las características de la sección bruta, $\bar{\lambda}$ es la esbeltez adimensional, $\bar{\lambda}_0$ es la esbeltez límite adimensional, L_{cr} es la longitud de pandeo en el plano de pandeo considerado, i es el radio de giro, χ es el coeficiente de reducción de resistencia y γ_{M1} es el factor de seguridad para inestabilidad igual a 1.1 [9].

2.3.3 Especificaciones del manual de diseño para acero inoxidable

La resistencia de cálculo al pandeo por flexión se propone calcular con las mismas expresiones establecidas en el código de diseño EN1993-1-4 [9], con la diferencia de un reajuste de las curvas de pandeo a través de factores de imperfección y límites de esbeltez independientes, para cada tipo de acero inoxidable.

El comportamiento no lineal de tensión – deformación del acero inoxidable, afecta al rendimiento de la resistencia a pandeo de los elementos, por lo cual se debe considerar en la predicción de las curvas de pandeo de forma independiente para cada tipo de acero inoxidable; esta consideración se tomará en cuenta en la nueva versión del código EN1993-1-4, cuyas expresiones serán obtenidas a través de una calibración mayor de datos [1].

El reajuste propuesto representa unas curvas de pandeo más conservadoras que el código EN1993-1-4 [9], donde para secciones huecas rectangulares conformadas en frío para aceros inoxidables austeníticos y dúplex el factor de imperfección $\alpha = 0.49$ y la esbeltez límite adimensional $\bar{\lambda}_0 = 0.3$, y para secciones huecas rectangulares conformadas en frío para aceros inoxidables ferríticos el factor de imperfección $\alpha = 0.49$ y la esbeltez límite adimensional $\bar{\lambda}_0 = 0.2$ [1].

2.4 Comportamiento de elementos sometidos a carga combinada

2.4.1 Especificaciones del código EN1993-1-4

Los elementos sometidos a flexión y compresión deben comprobarse a pandeo por flexión de acuerdo a lo establecido en las secciones 2.3.2, además debe verificarse la capacidad del elemento a cargas combinadas de flexión más compresión [1]. La verificación de la capacidad de resistencia del elemento se determina con las ecuaciones (2.13) y (2.14).

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{W_{y \cdot f_y}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{z,Ed}}{\frac{W_{z \cdot f_y}}{\gamma_{M0}}} \leq 1 \quad \text{Para secciones clase 1, 2 y 3} \quad (2.13)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{A_{ef} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{ny}}{\frac{W_{y(ef)} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{nz}}{\frac{W_{z(ef)} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}} \leq 1 \quad \text{Para secciones clase 4} \quad (2.14)$$

Donde N_{Ed} es el esfuerzo axial de compresión de cálculo en el elemento, $M_{y,Ed}$ es el momento flector de cálculo alrededor del eje fuerte, $M_{z,Ed}$ es el momento flector de cálculo alrededor del eje débil, A es el área de la sección transversal del elemento, f_y es el límite elástico, W_y, W_z son el módulo de la secciones transversales en el sentido y-y o z-z, se considera módulo plástico para secciones clase 1 o 2 y el módulo elástico para secciones clase 3, $W_{y(ef)}, W_{z(ef)}$ son los módulos de las secciones efectivas en el sentido y-y o z-z, A_{ef} es el área de la sección transversal efectiva, e_{ny}, e_{nz} son las excentricidades del esfuerzo axial al transformar la sección bruta en sección reducida cuando aquella se ve sometida exclusivamente a esfuerzo axial, y γ_{M0} es el factor de seguridad para resistencia igual a 1.1.

Los efectos de interacción deberán ser considerados a lo largo de la longitud del elemento, de acuerdo a la disposición de las cargas, es decir la flexión alrededor del eje fuerte o débil sumado a un esfuerzo de compresión.

2.4.1.1 Comportamiento de elementos a compresión y momento flector alrededor del eje fuerte

La función de las expresiones es verificar el pandeo alrededor del eje fuerte o el pandeo alrededor del eje débil en elementos sometidos a pandeo por flexión.

Para evitar el pandeo alrededor del eje fuerte:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd(min)}} + K_y \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_y}{\beta_{w,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (2.15)$$

2.4.1.2 Comportamiento de elementos a compresión y momento flector alrededor del eje débil

Para evitar el pandeo alrededor del eje débil:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd(min)}} + K_z \left(\frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} \cdot e_z}{\beta_{w,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (2.16)$$

Donde e_y y e_z son excentricidades del eje neutro cuando la sección transversal está sometida a compresión uniforme, N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ y $M_{z,Ed}$ son los valores de cálculo del esfuerzo axial de compresión y los máximos momentos flectores alrededor de los ejes y-y y z-z, $N_{b,Rd(min)}$ es el menor valor de $N_{b,Rd}$ para los siguientes modos: pandeo de flexión alrededor del eje y-y, pandeo por flexión alrededor del eje z-z, pandeo por torsión y torsión y flexión, $\beta_{w,y}$, $\beta_{w,z}$ son los valores de β_w calculados para los ejes y-y, z-z respectivamente $\beta_w = 1$ para clase 1 o 2, W_{el} / W_{pl} para secciones

clase 3, W_{eff} / W_{pl} para clase 4, W_{pl} es el módulo plástico de la sección transversal y K_y , K_z son coeficientes de interacción [9].

$$K_y = 1 + 2(\bar{\lambda}_y - 0.5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rdy}} \quad \text{Para } 1.2 \leq K_y \leq 1.2 + 2 \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rdy}} \quad (2.17)$$

$$K_z = 1 + 2(\bar{\lambda}_z - 0.5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rdz}} \quad \text{Para } 1.2 \leq K_z \leq 1.2 + 2 \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rdz}} \quad (2.18)$$

2.4.2 Especificaciones del manual de diseño para acero inoxidable

El manual de diseño de acero inoxidable establece las mismas expresiones de diseño a esfuerzos combinados de compresión y flexión que el código EN1993-1-4 [9], se propone coeficientes de interacción para secciones huecas rectangulares, las cuales reflejan una predicción más real de las secciones [1].

$$K_y = 1 + D_1(\bar{\lambda}_y - D_2) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rdy}} \leq 1 + D_1(D_3 - D_2) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rdy}} \quad (2.19a)$$

$$K_z = 1 + D_1(\bar{\lambda}_z - D_2) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rdz}} \leq 1 + D_1(D_3 - D_2) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rdz}} \quad (2.19b)$$

Tabla 2 Valores de D_1 , D_2 , y D_3 , para la interacción [1].

Sección	Grado	D_1	D_2	D_3
hueca rectangular (SHR)	Ferrítico	1.3	0.45	1.6
	Austenítico	2.0	0.30	1.3
	Dúplex	1.5	0.40	1.4

2.5 Método de la resistencia continua (continuous strength method CSM)

El método de resistencia continua (continuous strength method CSM) es un método que se basa en el comportamiento no lineal y los efectos de endurecimiento por deformación de varios materiales como el acero inoxidable y el acero al carbono, lo que permite tener predicciones más reales de la resistencia de los elementos estructurales. Actualmente el CSM permite predecir la resistencia de las secciones transversales a compresión, flexión y carga combinada, sin embargo, todavía no han desarrollado expresiones que permitan conocer el comportamiento para fenómenos de inestabilidad del elemento estructural.

El comportamiento del acero inoxidable se caracteriza por la forma redondeada de la curva tensión-deformación, por lo cual el acero inoxidable no posee un límite elástico definido, el método CSM permite interpretar este comportamiento a través de un modelo bilineal con un endurecimiento lineal.

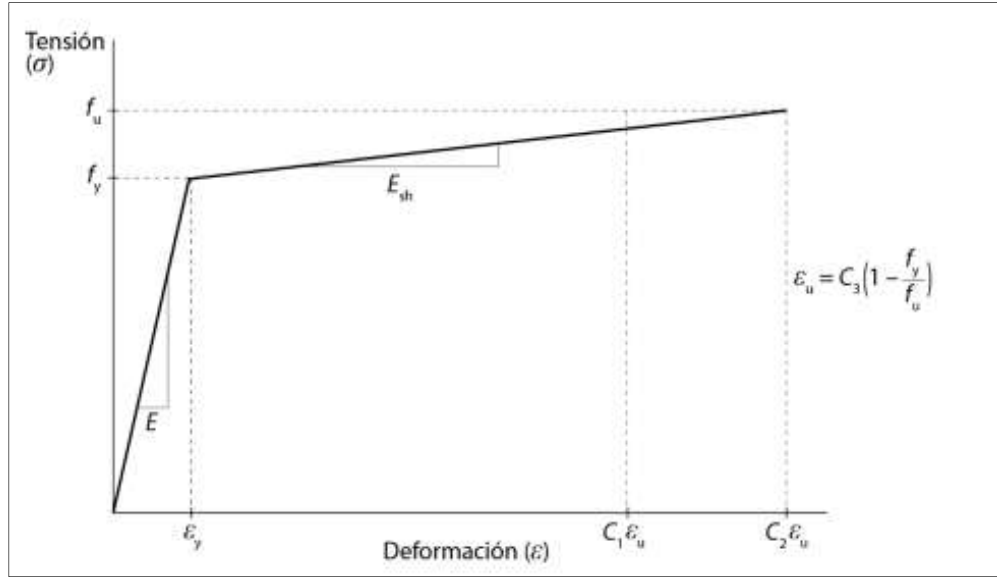


Figura 6 Modelo del material para el CSM [1].

Donde el módulo de la rama de endurecimiento se define a través de la ecuación (2.20), donde C_2 es un coeficiente para el modelo del material CSM, $C_2 = 0.16$ para aceros inoxidables austeníticos y dúplex y $C_2 = 0.45$ para aceros inoxidables ferríticos.

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_2 \varepsilon_u - \varepsilon_y} \quad (2.20)$$

La capacidad de deformación de la sección transversal se basa en la proporción de la relación entre la capacidad de deformación proporcionada por el CSM ε_{csm} y la deformación correspondiente al límite elástico ε_y , en términos de la esbeltez seccional $\bar{\lambda}_p$ ecuaciones (2.21a) y (2.21b), donde C_1 es el coeficiente para el modelo material del CSM $C_1 = 0.1$ para aceros inoxidables austeníticos - dúplex y $C_1 = 0.4$ para aceros inoxidables ferríticos, ε_u es la deformación última correspondiente a la resistencia última ecuación (2.22), $C_3 = 1$ para aceros austeníticos - dúplex y $C_3 = 0.6$ para aceros inoxidables ferríticos.

La ecuación (2.21a) se aplica a secciones robustas (secciones clase 1, 2 o 3), cuya expresión considera el endurecimiento por deformación que desarrollan los elementos conformados en frío. La ecuación (2.21b) se aplica únicamente a secciones esbeltas (secciones clase 4), donde se considera el efecto de la abolladura local, es decir no es necesario calcular el área efectiva de la sección transversal del elemento.

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{0.25}{\bar{\lambda}_p^{3.6}} \leq \min \left(15, \frac{C_1 \varepsilon_u}{\varepsilon_y} \right) \quad \text{Para } \bar{\lambda}_p \leq 0.68 \quad (2.21a)$$

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \left(1 - \frac{0.222}{\bar{\lambda}_p^{1.050}} \right) \frac{1}{\bar{\lambda}_p^{1.050}} \quad \text{Para } \bar{\lambda}_p > 0.68 \quad (2.21b)$$

$$\varepsilon_u = C_3 \left(1 - \frac{f_y}{f_u} \right) \quad (2.22)$$

$$\overline{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cr,p}}} \quad (2.23)$$

Para secciones conformadas por chapas, la tensión crítica ideal de abolladura $f_{cr,p}$ de la sección transversa completa sometida a un estado de carga específico, puede determinarse numéricamente utilizando algún software como por ejemplo el CUFSM [10] o calcularse de manera conservadora como la tensión crítica ideal de abolladura del panel más esbelto, ecuación (2.24). [11]

$$f_{cr,p} = \frac{k\sigma \pi^2 E t^2}{12(1-\nu^2)b^2} \quad (2.24)$$

Donde b es el ancho del panel, t es el espesor de chapa del panel, ν es el coeficiente de Poisson del acero, $k\sigma$ es el coeficiente de abolladura del panel correspondiente a una distribución de tensiones y condiciones de contorno determinadas.

El límite $\overline{\lambda}_p \leq 0.68$ se adopta debido a que más allá de este límite, el beneficio es poco significativo al considerar los efectos de endurecimiento por deformación del material, el fallo de la sección llega a ser gobernada por abolladura local.

2.5.1 Resistencia de la sección a compresión

Para secciones formadas por chapas $\overline{\lambda}_p \leq 0.68$ correspondiente a $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y \geq 1.0$ la resistencia a compresión se determina con la ecuación (2.25). Donde A es el área de la sección transversal, f_{csm} es la resistencia de cálculo correspondiente a ε_{csm} ecuación (2.26), la cual es determinada a partir del modelo bilineal.

$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = \frac{A f_{csm}}{\gamma_{M0}} \quad (2.25)$$

$$f_{csm} = f_y + E_{sh} \varepsilon_y \left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right) \quad (2.26)$$

Para secciones formadas por chapas $\overline{\lambda}_p > 0.68$ correspondiente a $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y < 1.0$, la resistencia a compresión se determina con la expresión (2.27) [1].

$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.27)$$

2.5.2 Resistencia de la sección a flexión

Para las secciones con una relación de la deformación normalizada y la deformación CSM mayores a uno ($\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y \geq 1.0$), la resistencia seccional a flexión puede determinarse a partir de la ecuación

(2.28). Donde W_{el} es el módulo resistente elástico de la sección transversal, W_{pl} es el módulo resistente plástico de la sección transversal, α es el parámetro a flexión del CSM $\alpha = 2$ para secciones huecas rectangulares.

$$M_{c,Rd} = M_{csm,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{Y_{M0}} \left[1 + \frac{E_{sh}}{E} \frac{W_{el}}{W_{pl}} \left(\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} - 1 \right) - \left(1 - \frac{W_{el}}{W_{pl}} \right) / \left(\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} \right)^\alpha \right] \quad (2.28)$$

Para aquellas secciones con $\epsilon_{csm}/\epsilon_y < 1.0$, la resistencia seccional a flexión puede determinarse con la ecuación (2.29) [1].

$$M_{c,Rd} = M_{csm} = \frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} \frac{W_{el} f_y}{Y_{M0}} \quad (2.29)$$

2.5.3 Resistencia de la sección a carga combinada de compresión y flexión

Para secciones huecas rectangulares donde $\bar{\lambda}_p \leq 0.60$ las fórmulas de cálculo para secciones sometidas a carga combinada de compresión y flexión alrededor del eje fuerte se calcula con la ecuación (2.30), eje débil se calcula con la ecuación (2.31), esviada se calcula con la ecuación (2.32), donde $M_{y,Ed}$ es el valor de cálculo del momento flector alrededor del eje fuerte y-y, $M_{z,Ed}$ es el valor de cálculo del momento flector alrededor del eje débil z-z, $M_{R,csm,y,Rd}$ es la resistencia a flexión reducida alrededor del eje fuerte y-y, $M_{R,csm,z,Rd}$ es la resistencia a flexión reducida alrededor del eje débil z-z, a_w es la relación entre el área de las almas y el área bruta de la sección, a_f es la relación entre el área de las alas y el área bruta de la sección, n_{csm} es la relación entre el valor de cálculo del esfuerzo axial de compresión N_{Ed} y la resistencia a compresión según CSM $N_{csm,Rd}$, α_{csm} y β_{csm} son los coeficientes de interacción para la flexión esviada (2.33) [1].

$$M_{y,Ed} \leq M_{R,csm,y,Rd} = M_{csm,y,Rd} * \frac{(1-n_{csm})}{(1-0.5a_w)} \leq M_{csm,y,Rd} \quad (2.30)$$

$$M_{z,Ed} \leq M_{R,csm,z,Rd} = M_{csm,z,Rd} * \frac{(1-n_{csm})}{(1-0.5a_f)} \leq M_{csm,z,Rd} \quad (2.31)$$

$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{R,csm,y,Rd}} \right]^{\alpha_{csm}} + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{R,csm,z,Rd}} \right]^{\beta_{csm}} < 1 \quad (2.32)$$

$$\alpha_{csm} \text{ y } \beta_{csm} = \frac{1.66}{(1-1.13 n_{csm}^2)} \quad (2.33)$$

Para secciones huecas rectangulares, donde $\bar{\lambda}_p > 0.60$ las fórmulas de cálculo para secciones sometidas a carga combinada de compresión más flexión alrededor del eje fuerte y débil se calcula con la ecuación (2.34) [1].

$$\frac{N_{Ed}}{N_{csm,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{csm,y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{csm,z,Rd}} \leq 1 \quad (2.34)$$

2.5.4 Nuevo estudio para el cálculo del pandeo a flexión $N_{b,csm}$

Esta nueva propuesta fue desarrollada por I. Arrayago E. Real, E. Mirambell y L. Gardner [12]. La investigación se basa en la teoría de Ayrton Perry, pero considerando las características beneficiosas del continuous strength method CSM en el cálculo de la resistencia de la sección transversal y la determinación de los parámetros de las imperfecciones de los elementos esbeltos.

Para considerar el comportamiento real del material, las ecuaciones pueden ser reemplazadas por términos de la resistencia del método de resistencia continua (continuous strength method CSM) en la expresión de Ayrton Perry. Se presenta el nuevo estudio para el cálculo del pandeo a flexión, donde $N_{csm,Rd}$ es la resistencia a compresión considerando el CSM, $\bar{\lambda}_{csm}$ es la esbeltez del elemento considerando la carga de compresión CSM ecuación (2.35), N_{cr} es el esfuerzo axil crítico, χ_{csm} es el factor de reducción de resistencia CSM ecuación (2.36), η^* es el parámetro de imperfección CSM ecuación (2.39), $\alpha_{EN/DM}$ es el parámetro a flexión del CSM, para secciones rectangulares $\alpha_{EN/DM}=2$, f_{csm} es la resistencia de cálculo correspondiente a ε_{csm} , $M_{csm,Rd}$ es la resistencia a flexión con el CSM, $\bar{\lambda}_0$ es la esbeltez límite adimensional, λ_p es la esbeltez local o seccional del elemento y $N_{b,csm}$ es la resistencia a pandeo por flexión del elemento de acuerdo con la teoría del CSM.

$$\bar{\lambda}_{csm} = \sqrt{\frac{N_{csm,Rd}}{N_{cr}}} \quad (2.35)$$

$$\chi_{csm} = \frac{1}{\phi_{csm} + \sqrt{\phi_{csm}^2 - \bar{\lambda}_{csm}^2}} \quad (2.36)$$

$$\phi_{csm} = 0.5(1 + \eta^* + \bar{\lambda}_{csm}^2) \quad (2.37)$$

$$N_{b,csm} = \frac{\chi_{csm} \cdot N_{csm,Rd}}{\gamma_{M1}} \quad (2.38)$$

$$\eta^* = \frac{W_{el} f_{csm}}{M_{csm,Rd}} \frac{e_{0,csm}}{e_{0,EN/DM}} \sqrt{\frac{f_y}{f_{csm}}} \alpha_{EN/DM} (\bar{\lambda}_{csm} - \bar{\lambda}_0) \quad (2.39)$$

$$\frac{e_{0,csm}}{e_{0,EN/DM}} = \begin{cases} C_5 - C_6 & \bar{\lambda}_p \leq 0.68 \\ 1 & \bar{\lambda}_p > 0.68 \end{cases} \quad (2.40)$$

Tabla 3 Propuesta de coeficientes C_5 y C_6 para diferentes aceros inoxidables [12].

Tipo de acero inoxidable	C_5	C_6
Austenítico	2.4	2.07
Ferrítico	1.8	1.22
Dúplex	2.11	1.64

2.6 Propuestas con el continuous strength method (CSM)

Las expresiones existentes de diseño de columnas sometidas a carga axial con momento flector presentan deficiencias en las predicciones de los puntos finales de las curvas de interacción, debido a que no se considera el endurecimiento por deformación, fenómeno que poseen todos los elementos conformados en frío, por lo cual las expresiones actuales tienden a proporcionar resultados muy conservadores, especialmente en elementos robustos [13].

El método de resistencia continua (continuous strength method CSM) es una teoría de diseño basado en la deformación, la cual permite considerar el endurecimiento por deformación en la determinación de la compresión de la sección transversal y las capacidades de momento flector. Este método es aplicable a secciones con una esbeltez local $\overline{\lambda}_p$ menores a 0.68, es decir para secciones no esbeltas (clase 1, clase 2 o clase 3).

Con la intención de mejorar las predicciones de cálculo se han realizado varias propuestas.

La propuesta desarrollada por O. Zhao [13], considera la resistencia a momento flector de acuerdo a la teoría del método de resistencia continua (continuous strength method CSM) con la ecuación (2.28), más la resistencia al pandeo por flexión con la teoría tradicional como se establece en el código EN1993-1-4 [9], cuya expresión se basa en la ecuación (2.12).

La propuesta de tesis consiste en la interacción a carga combinada de la resistencia a momento flector ecuación (2.28), más la resistencia del pandeo a flexión considerando la teoría del método de resistencia continua (continuous strength method CSM) ecuación (2.38).

2.6.1 Estudio de la interacción con el momento resistente CSM

Las expresiones de diseño para la interacción de carga axial con momento flector, se basan en el formato básico de la ecuación (2.41), donde N_{Ed} es la carga axial aplicada, M_{Ed} es el momento máximo de flexión de primer orden aplicado alrededor del eje de pandeo, $N_{b,Rd}$ es la resistencia a pandeo del elemento, $M_{b,Rd}$ es la resistencia a flexión del miembro, la cual sustituye a la resistencia de pandeo lateral y K es el factor de interacción ecuación (2.17).

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + K \frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1 \quad (2.41)$$

La nueva propuesta de diseño de columna sometida a carga combinada de axial con momento flector, se basa en el uso de la capacidad de momento de flexión CSM ecuación (2.28), para sustituir a la resistencia a la flexión en la ecuación (2.41), por lo cual la nueva expresión para predecir la resistencia a pandeo por flexión con la interacción a carga axial con momento flector es la ecuación (2.42), esta propuesta fue desarrollada y comprobada por O. Zhao [13], quien ha demostrado la confiabilidad de resultados en comparación con las expresiones de interacción tradicionales.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + K_{csm} \frac{M_{Ed}}{M_{csm,Rd}} \leq 1 \quad (2.42)$$

Los factores de interacción del continuous strength method (CSM), permiten obtener curvas de interacción ajustadas con respecto a las capacidades de resistencias del acero inoxidable. Los factores de interacción se determinan mediante los coeficientes D_1 , D_2 y D_3 , donde D_1 y D_2 definen la relación lineal entre K_{csm} y $\bar{\lambda}$ en el rango de esbelteces más bajo y el coeficiente D_3 que es un valor límite más allá del cual el factor de interacción permanece constante, los coeficientes se encuentran en la Tabla 2, y el factor de interacción K_{csm} se determina con la ecuación (2.19a).

2.6.2 Estudio de la interacción con el momento resistente y el pandeo por flexión CSM

La primera propuesta para la interacción de carga axial con momento flector, se basa en el formato básico de la ecuación (2.41). Esta nueva propuesta de diseño de columna sometida a carga combinada, se basa en el uso de la capacidad del momento de flexión, de acuerdo a la teoría del CSM $M_{csm,Rd}$ ecuación (2.28), para sustituir a la resistencia a flexión $M_{b,Rd}$, y el uso de la resistencia a pandeo por flexión considerando la teoría del CSM $N_{b,csm}$ ecuación (2.38), para sustituir a la resistencia al pandeo a flexión de acuerdo a la teoría establecida en el código EN1993-1-4 $N_{b,Rd}$.

Por consiguiente, la nueva expresión para predecir la resistencia a pandeo por flexión con la interacción a carga axial con momento flector es la ecuación (2.43), donde N_{Ed} es la carga axial aplicada, M_{Ed} es el momento máximo de flexión de primer orden aplicado alrededor del eje de pandeo, $N_{b,csm}$ es la resistencia a pandeo del elemento de acuerdo a la teoría del CSM ecuación (2.38), $M_{csm,Rd}$ es la resistencia a la flexión del miembro considerando el CSM ecuación (2.28), y K_{csm}^* es el factor de interacción considerando el pandeo a flexión con el CSM ecuación (2.44).

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,csm}} + K_{csm}^* \frac{M_{Ed}}{M_{csm,Rd}} \leq 1 \quad (2.43)$$

$$K_{csm}^* = 1 + D_1(\bar{\lambda} - D_2) \frac{N_{Ed}}{N_{b,csm}} \leq 1 + D_1(D_3 - D_2) \frac{N_{Ed}}{N_{b,csm}} \quad (2.44)$$

2.7 Información correspondiente a estudios experimentales adicionales

Se ha realizado una investigación previa de recopilación de información que corresponde a otros autores. Los datos recopilados incluyen resultados de ensayos o estudios experimentales, sobre elementos sometidos a cargas de compresión y carga combinada de flexión más compresión en elementos de acero inoxidable de sección hueca rectangular.

La información adicional se incluirá en la validación de datos en los posteriores capítulos y proporcionará un mayor grado de confiabilidad a la investigación. Los resultados se clasifican según el tipo de acero inoxidable y tipo de sección transversal, siendo perfiles SHS secciones cuadradas y RHS a las secciones rectangulares. En la Figura 7 se representa el número de datos obtenidos y se recopila toda la información en la Tabla 4.

Tabla 4 Estudios experimentales adicionales

Referencia	Tipo de sección transversal	Nº de ensayos	Grado	Familia
I. Arrayago, E. Real, E. Mirambell y L. Gardner [12]	SHS	7	1.4003	Ferrítico
L. Gardner y D. Nethercot [14]	SHS	4	1.4301	
	RHS	5	1.4301	
L. Gardner, A. Talja y N. Badoo [15]	RHS	3	1.4318	
W. Liu y B. Young [16]	SHS	5	1.4301	Austenítico
O. Zhao, B. Rossi, L. Gardner y B. Young [17]	SHS	2	1.4301	
	SHS	3	1.4571	
	RHS	3	1.4307	
W. Lui [18]	SHS	2	1.4462	Dúplex
W. Liu y B. Young [19]	SHS	6	1.4318	
Y. Huang y B. Young [20]	SHS	5	1.4162	Lean Dúplex

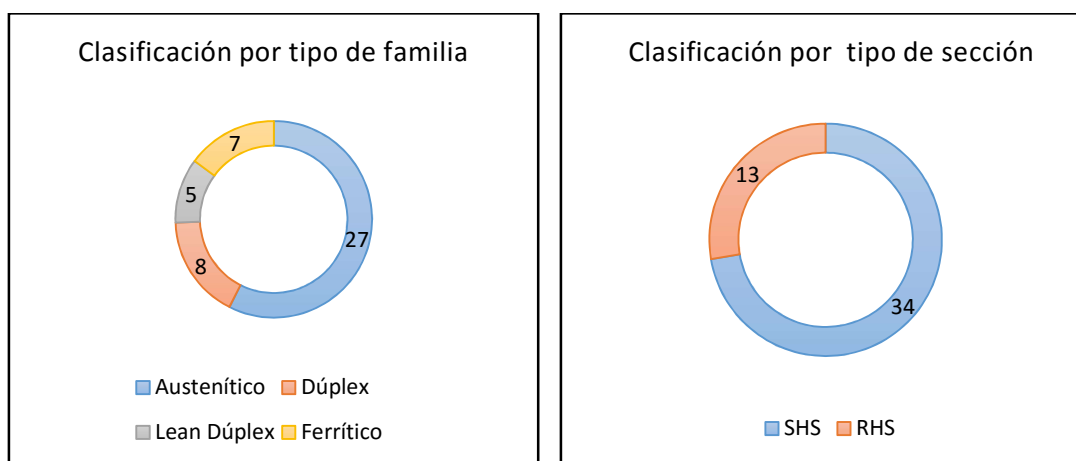


Figura 7 Elementos a pandeo por flexión por tipo de familia y tipo de sección (estudios adicionales).

3 MODELO NUMÉRICO

3.1 Introducción

Este capítulo tiene como objetivo describir el proceso de análisis de un modelo numérico, a través del programa de uso general Abaqus, el cual será calibrado y validado por un estudio experimental realizado en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló, del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). El estudio del modelo numérico permitirá garantizar la confiabilidad del modelo a utilizarse en el estudio paramétrico.

3.2 Elementos finitos

El método de elementos finitos es un método numérico que se basa en la aproximación de sistemas continuos, mediante la subdivisión de un sólido en un número finito de elementos interconectados mediante nudos, el campo de desplazamientos en el interior de cada elemento puede expresarse en función de los desplazamientos que sufren los nudos, al determinar el desplazamiento es posible obtener las tensiones y deformaciones estableciendo las ecuaciones de equilibrio, compatibilidad y constitutivas del material.

El desarrollo del estudio se ha realizado mediante el programa computacional Abaqus [21], el cual será la herramienta para determinar las capacidades de resistencia de los elementos a través de las propiedades geométricas y mecánicas de las secciones.

3.3 Descripción del estudio

En el Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló, del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), se realizaron ensayos de pandeo por flexión en columnas, para investigar el comportamiento de los elementos de acero inoxidable, se ensayaron cinco miembros ferríticos RHS y SHS con una longitud nominal de 1500 mm bajo compresión pura y siete miembros bajo carga combinada de compresión y flexión a través de una carga excéntrica fijada en el apoyo superior e inferior.

El objetivo general es reproducir con un modelo numérico, las condiciones de un ensayo real, para lo cual se eligió un esquema de una columna con condiciones de contorno específicas para generar un momento uniforme en el elemento, a través de diferentes estados de carga.

Los datos fueron obtenidos de la investigación presentada por I. Arrayago, E. Real, E. Mirambel y L. Gardner [11].

3.3.1 Propiedades del material

Se realizaron pruebas de tracción en probetas extraídas de las muestras, para conocer el comportamiento real del material, se determinó las dimensiones exactas de los elementos y las amplitudes de las imperfecciones iniciales. Los ensayos en las muestras de acero inoxidable ferrítico fueron de grado EN1.4003, las propiedades mecánicas generales fueron obtenidas del fabricante, las cuales se detallan en la Tabla 5, donde $\sigma_{0.2}$ es el límite elástico para una deformación remanente del 0.2%, σ_1 es la tensión para una deformación del 1%, σ_u es la tensión última y ϵ_f es la deformación de rotura.

Las secciones se representan de la siguiente manera: S1 representa la sección con dimensiones de 80 mm x 80 mm con 4 mm de espesor de pared de la sección transversal, S2 representa la sección con dimensiones de 60 mm x 60 mm con 3 mm de espesor de pared de la sección transversal y S3 representa a la sección de 80 mm x 40 mm con 4 mm de espesor de pared de la sección transversal.

Tabla 5 Propiedades mecánicas del material presentadas por el fabricante [22].

Secciones		$\sigma_{0.2}$ [MPa]	σ_1 [MPa]	σ_u [MPa]	ϵ_f (%)
80X80X4	S1	389	419	545	27
60X60X3	S2	343	367	495	35
80X40X4	S3	366	389	501	29

El conformado en frío de las secciones rectangulares afecta a las regiones de las esquinas y las zonas planas con incrementos de la deformación plástica, este aumento de la resistencia ha sido determinado mediante ensayos de tracción de muestras extraídas de las secciones, los datos se muestran en la Tabla 6, donde n y m son los coeficientes de endurecimiento. Las regiones de las esquinas se simbolizan con la letra C y las zonas planas se simbolizan con la letra F.

Tabla 6 Resultados de las pruebas de tracción de las muestras extraídas de las secciones [22].

Secciones		E [MPa]	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	σ_u [MPa]	ϵ_u (%)	n	m
80X80X4	S1-F	173992	521	559	8.2	12.4	2.3
	S1-C	170049	577	645	1.1	5.0	5.4
60X60X3	S2-F	186896	485	505	6.8	12.2	2.6
	S2-C	178049	555	587	1.0	7.9	5.2
80X40X4	S3-F	181632	507	520	3.6	16.4	2.5
	S3-C	183684	558	601	1.0	5.9	4.5

Es importante analizar las características de los materiales, para elegir el modelo constitutivo que reproduzca mejor el comportamiento real del material que es el propósito del análisis.

El comportamiento de un material elástico con un rango bajo de tensiones, le permite recuperar completamente las deformaciones originadas durante el proceso de carga. Cuando la tensión excede un nivel particular, las deformaciones producidas durante el proceso de carga no se recuperan por completo, este comportamiento se puede determinar con las expresiones explicadas en la sección 2.2 del capítulo 2.

Se determinó las curvas tensión - deformación de las zonas planas y las regiones de las esquinas, donde se puede apreciar que el comportamiento es diferente en cada región a causa del endurecimiento por deformación que sufre la pieza durante su fabricación. La operación de conformado en frío induce un aumento de la tensión elástica del material.

Con la aplicación de las ecuaciones explicadas en la sección 2.2 del capítulo 2, se puede representar el comportamiento tensión - deformación del material de las regiones planas y de las esquinas de las secciones transversales de los elementos; este comportamiento se encuentra representado por cada sección en todos los elementos y los resultados se muestran de la Figura 8 a la Figura 10.

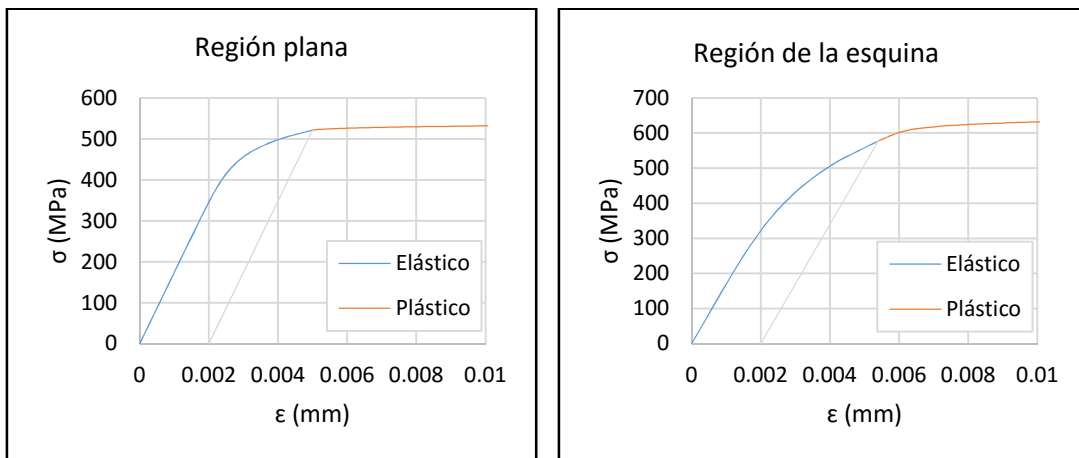


Figura 8 Comportamiento en las regiones de la sección 80X80X4

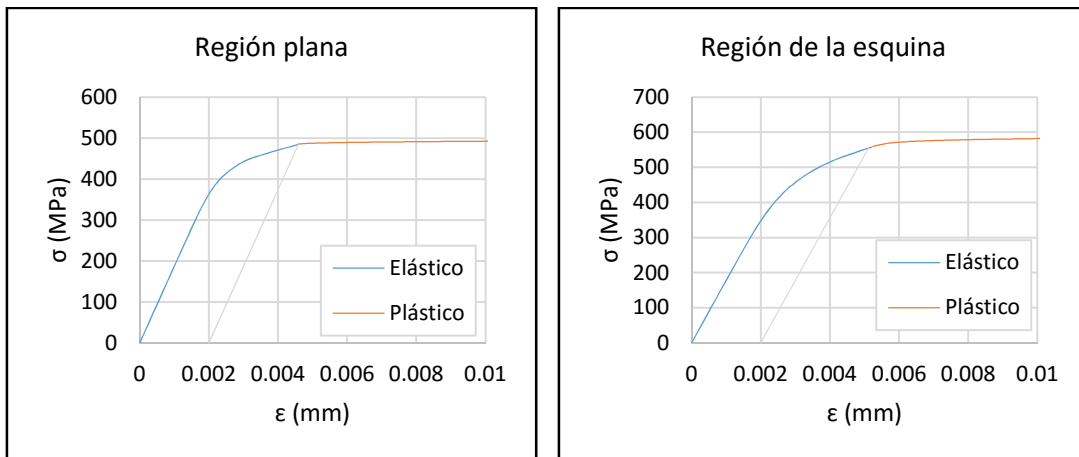


Figura 9 Comportamiento en las regiones de la sección 60X60X3.

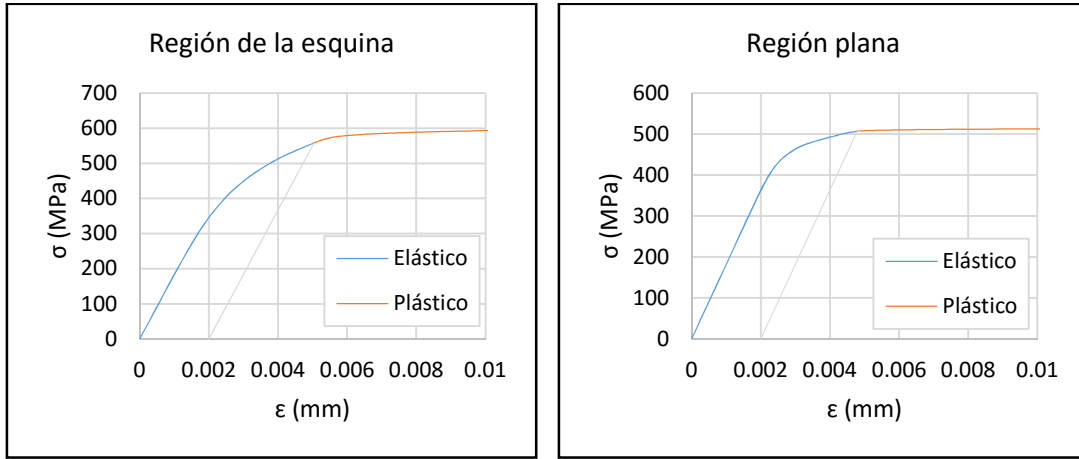


Figura 10 Comportamiento en las regiones de la sección 80X40X4.

El comportamiento de las regiones planas y de las esquinas de las secciones transversales, ha sido considerado en el análisis de los resultados, calculando las propiedades promedio según lo estableció Hradil y Talja [23], a través de la ecuación (3.1), donde A_f es el área de la región de la placa, A_c es el área de la región esquina, σ_f es el límite elástico de la región placa y σ_c es el límite elástico de la región esquina, los resultados se muestran en la Tabla 7.

$$\sigma = \frac{A_f \cdot \sigma_f + A_c \cdot \sigma_c}{A_f + A_c} \quad (3.1)$$

Tabla 7 Propiedades promedios de las secciones transversales [22].

Secciones		E [MPa]	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	σ_u [MPa]	ϵ_u (%)	n	m
80X80X4	S1	172615	539	587	5.8	8.8	2.6
60X60X3	S2	183667	509	533	4.8	11.0	3.2
80X40X4	S3	182637	529	554	2.5	12.9	2.7

3.3.2 Imperfecciones geométricas globales

En el estudio de calibración solo se tomarán en cuenta las imperfecciones globales, debido a que las imperfecciones locales son poco significativas en secciones robustas, las cuales se utilizan para la calibración del modelo numérico.

Se determinaron las geometrías reales de todas las muestras mediante la medición de todas las dimensiones relevantes, donde L es la longitud total del elemento, H es el alto total de la sección transversal, B es el ancho total de la sección transversal, t es el espesor o grosor de las paredes de la sección transversal, R_{ext} es el radio de la esquina externa. Para cada sección se hicieron pruebas concéntricas simbolizadas como CC y pruebas excéntricas simbolizadas como EC1 y EC2, los datos se muestran en la Tabla 8.

Las imperfecciones globales o curvatura inicial se midieron con un dispositivo láser. Las muestras se apoyaron en dos puntos fijos en los dos extremos de cada sección. Las imperfecciones se midieron moviendo el dispositivo láser a lo largo del elemento y se registraron mediciones cada 100 mm, los datos se muestran en la Tabla 8, donde w_g es la imperfección global del elemento y e_0 es la excentricidad inicial.

Tabla 8 Dimensiones de las secciones ensayadas [22].

Espécimen	L [mm]	H [mm]	B [mm]	t [mm]	R_{ext} [mm]	w_g [mm]	e_0 [mm]	Clase
S1-CC	1495	79.6	80.2	3.9	7.0	0.81	0	Clase 1
S1-EC1	1495	80.1	80.3	3.9	7.3	1.25	20	
S1-EC2	1498	79.9	80.3	4.0	7.5	1.38	40	
S2-CC	1500	60.3	60.2	2.9	5.9	0.66	0	
S2-EC1	1500	60.0	60.2	3.0	5.9	0.69	30	
S3-CC	1500	80.0	40.0	3.8	6.8	0.85	0	
S3-EC1	1500	80.0	40.2	3.8	6.5	0.89	20	

3.4 Análisis en el programa Abaqus

Se describe la información con respecto al análisis de elementos finitos realizado para la calibración del modelo, el estudio se realiza con el paquete de propósito general Abaqus. Esta investigación numérica tiene como objetivo replicar las pruebas del laboratorio para validar el modelo a utilizar en esta tesis.

3.4.1 Criterios generales de los modelos

Se consideraron ciertos criterios para replicar las condiciones del ensayo real en el estudio numérico, los cuales se explican a continuación:

Para las condiciones de contorno se utilizó un apoyo tipo cinemático a una distancia de 50 mm de la sección del perfil. El apoyo inferior está restringido en todas las direcciones y permite el giro únicamente alrededor del eje de pandeo. El punto de carga se ubica en la parte superior, cuyas condiciones de contorno son similares al apoyo inferior, pero se permite el desplazamiento en el sentido longitudinal del elemento y se permite el giro al rededor del eje de pandeo.

Para el análisis de elementos finitos, se subdividió al elemento en secciones rectangulares con elementos shell de 4 nodos, para determinar las dimensiones de la malla shell se realizó un estudio de convergencia, el cual se explica en la sección 3.4.2.

La efectividad de utilizar elementos shell para representar secciones de paredes delgadas, se basa en investigaciones previas realizadas por Theofanous y Gardner [24], Ashraf [25].

Para considerar el aumento de la resistencia en las esquinas debido al conformado en frío, se asignó un shell homogéneo para las secciones de las esquinas y otro para las secciones planas. En las secciones de las esquinas el mejoramiento de la resistencia se estableció hasta una distancia de dos veces el espesor de la placa, este criterio se basó en estudios previos y especificaciones del manual de diseño [1].

Con el objetivo de incluir los materiales en el análisis de elementos finitos, el método fue aproximar la curva continua original con una curva estimada, la curva continua original se expone de la Figura 8 a la Figura 10. Debido a que algunos softwares comerciales para el análisis mediante elementos finitos requieren definición del comportamiento de los materiales basados en la parte plástica del modelo, por lo cual se debe determinar las tensiones y deformaciones plásticas correspondientes a partir del límite de proporcionalidad. La deformación plástica relativa a cada nivel de tensión, puede calcularse a partir de la ecuación (3.2) [1]. Donde ε representa a la deformación correspondiente a una tensión σ .

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \quad (3.2)$$

El problema de estabilidad de la estructura se evalúa en dos pasos:

1. Para determinar los modos de pandeo o colapso que desarrollará el elemento, se realizó un análisis de pandeo (buckling) considerando el rango lineal del material. El análisis de autovalores denominado también en el programa Abaqus “buckle linear perturbation”, consiste en determinar la primera carga que llega a producir una inestabilidad en el elemento durante el rango lineal o elástico del material. Este análisis sirve para conocer los modos de inestabilidad del elemento [25].
Una vez obtenido el primer modo de pandeo, el procedimiento implica la colocación de una imperfección, las imperfecciones que se consideraron en el análisis se explican en la sección 3.3.2.
2. Para estudiar el comportamiento de la estructura, se realizó un análisis no lineal geométrico y no lineal del material (static-risk), cuyo resultado será la carga última. El análisis incremental que también se denomina análisis risk es una modificación del método de longitud de arco, el cual es un método incremental de carga y desplazamiento, a través de un número limitado de interacciones, nos podemos acercar a la solución. El método incremental consiste en dividir la carga o un desplazamiento en pequeños incrementos sucesivos, en cada incremento se actualiza las coordenadas nodales, las condiciones del material para cada uno de los puntos de interacción del sistema y en cada caso se resuelve el equilibrio. Para alcanzar el equilibrio del sistema se debe utilizar la ecuación matricial y obtener el equilibrio entre las cargas aplicadas y la sumatoria de las tensiones internas [25].

3.4.2 Análisis de convergencia de malla

Se realiza un análisis para investigar la convergencia del modelo al aumentar la densidad de la malla, para obtener una correcta precisión del análisis con un costo computacional adecuado. El análisis de convergencia permite determinar el tamaño adecuado en la malla de los elementos.

El análisis consiste en modelar el elemento S2-CC con dimensiones 60.3 x 60.2 x 2.9 mm y una longitud de 1500 mm. Se modela el elemento con diferentes dimensiones de malla (25 mm, 15 mm, 12 mm, 10 mm y 8 mm). Los resultados se resumen en la Tabla 9, Tabla 10 y se representa a través de la Figura 11 a la Figura 13. La convergencia de los elementos se determina mediante la relación $N_{cr(ef)} / N_{cr(cal)}$, donde $N_{cr(cal)}$ es la carga crítica de Euler, ecuación (3.3) y $N_{cr(ef)}$ es la carga crítica producto del análisis de autovalores obtenido del programa Abaqus.

$$N_{cr(cal)} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} \quad (3.3)$$

Donde E es el módulo de elasticidad del material, I es la inercia alrededor del eje de pandeo y L_{cr} es la longitud de pandeo en el plano considerado del pilar.

Tabla 9 Resultados obtenidos del análisis de convergencia (Carga crítica de Euler).

Mallas (mm)	Nº elementos	$N_{cr(cal)}$ [kN]	$N_{cr(ef)}$ [kN]	$N_{cr(ef)} / N_{cr(cal)}$	Diferencia $N_{cr(ef)}$ [kN]	Porcentaje (%)
25	1200	258.2	222.58	0.862		
15	2400	258.2	235.26	0.911	12.68	5.39%
12	3528	258.2	237.59	0.920	2.33	0.98%
10	4800	258.2	238.40	0.923	0.81	0.34%
8	6768	258.2	238.77	0.925	0.37	0.15%

Tabla 10 Resultados obtenidos del análisis de convergencia (Carga última).

Mallas (mm)	Nº elementos	N_u [kN]	Diferencia [kN]	Porcentaje (%)
25	1200	173.67		
15	2400	180.82	7.15	3.95%
12	3528	182.07	1.24	0.68%
10	4800	182.45	0.38	0.21%
8	6768	182.65	0.20	0.11%

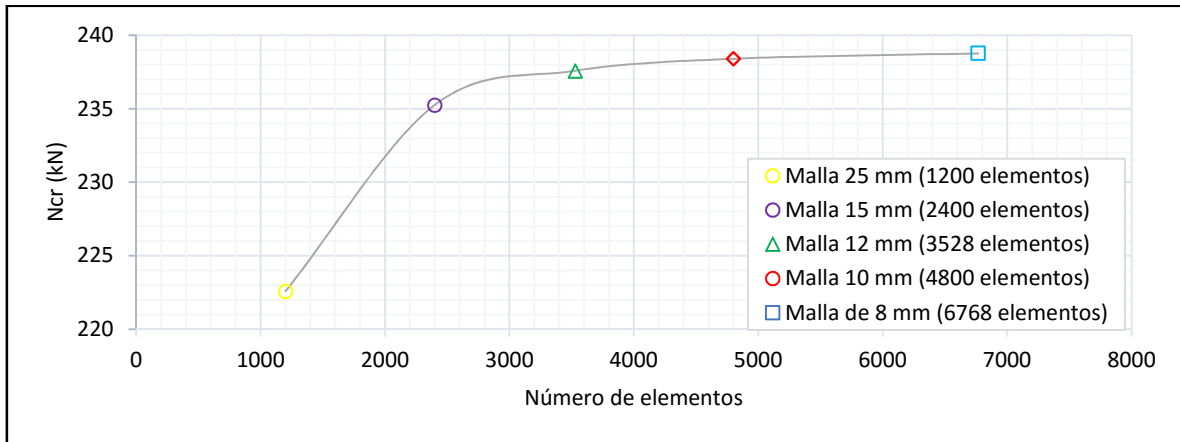


Figura 11 Resultados del análisis de convergencia de malla (N_{cr} vs número de elementos).

La carga de pandeo se vuelve estable, con un número elevado de elementos finitos de aproximadamente 4800 correspondiente a una malla de 10 mm.

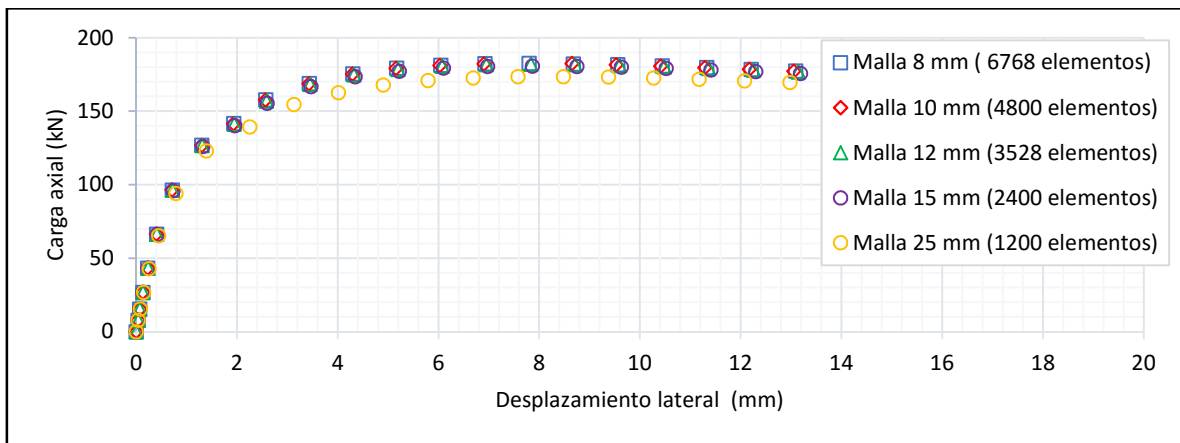


Figura 12 Resultados del análisis de convergencia de malla (Carga axial vs Desplazamiento lateral).

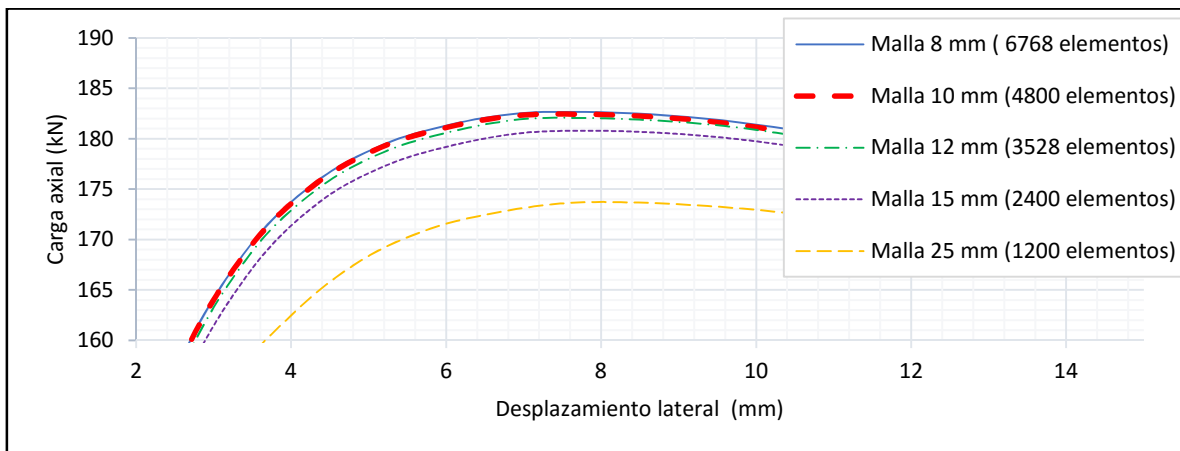


Figura 13 Diferencia de magnitudes en la convergencia de malla (Carga axial vs Desplazamiento lateral).

3.5 Comparación de pruebas experimentales

Como ya se ha mencionado, el objetivo de esta investigación es llegar a reproducir los resultados obtenidos en el ensayo del laboratorio, y para este propósito, se hará referencia a la investigación realizada por I. Arrayago, E. Real, E. Mirambell, L. Gardner [12], cuyo trabajo es útil para comparar resultados experimentales con los resultados numéricos dados por el modelo utilizado en esta tesis. Todas las propiedades mecánicas y geométricas de las columnas se presentaron en la Tabla 6 y la Tabla 8. Estas propiedades se han utilizado para desarrollar los modelos de elementos finitos. Los resultados se exponen en la Figura 14, Figura 15 y Figura 16.

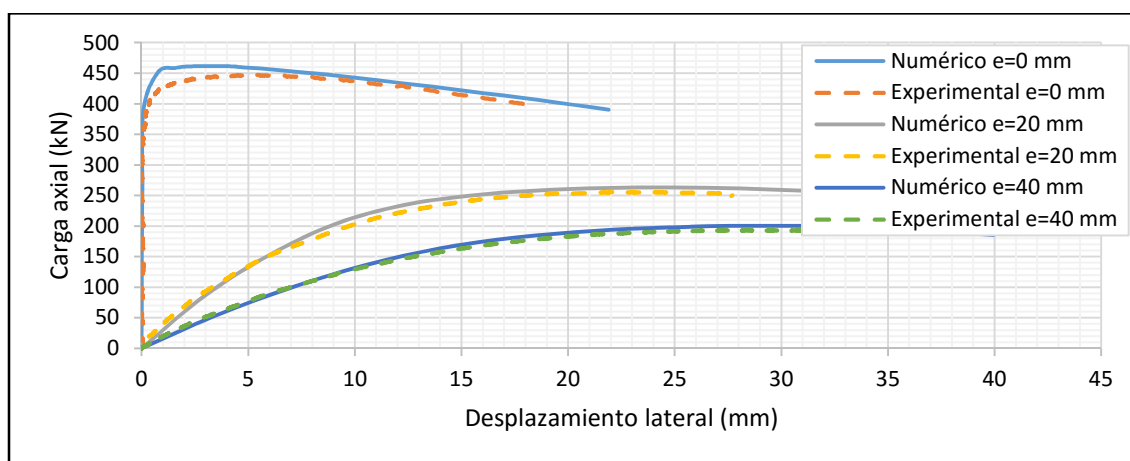


Figura 14 Comparación modelo numérico con el modelo experimental (S1-80X80X4).

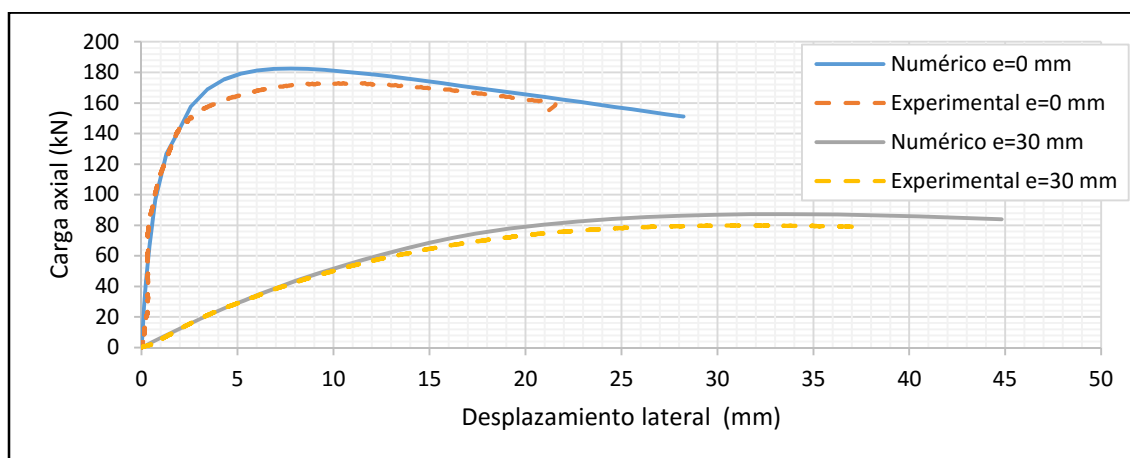


Figura 15 Comparación modelo numérico con el modelo experimental (S2-60X60X3).

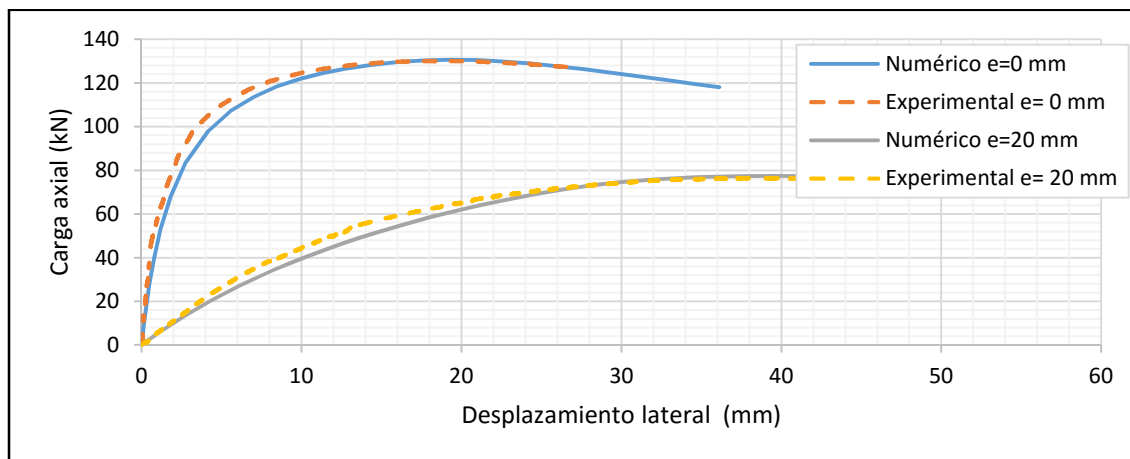


Figura 16 Comparación modelo numérico con el modelo experimental (S3-80X40X4).

Se determina la exactitud de las pruebas a través de la relación N_{num}/N_{exp} , los resultados se muestran en la Tabla 11, donde N_{num} es la carga última obtenida del estudio numérico realizado en el programa Abaqus, y N_{exp} es la carga última obtenida del ensayo en el laboratorio o estudio experimental, también se realiza una comparación del desplazamiento lateral registrado en el análisis numérico δ_{num} y el desplazamiento lateral obtenido del ensayo δ_{exp} .

Tabla 11 Comparación del estudio numérico y experimental.

Espécimen	N_{num} [kN]	N_{exp} [kN]	N_{num}/N_{exp}	δ_{num} [mm]	δ_{exp} [mm]	$\delta_{num}/\delta_{exp}$	Clase
S1-CC	461.52	447	1.03	3.96	4.97	0.80	Clase 1
S1-EC1	263.14	256	1.03	24.84	23.00	1.08	
S1-EC2	200.38	193.5	1.04	28.51	28.55	1.00	
S2-CC	182.45	173.1	1.05	8.65	9.94	0.87	
S2-EC1	87.36	79.99	1.09	33.52	31.20	1.07	
S3-CC	130.62	130.2	1.00	19.38	18.56	1.04	
S3-EC1	77.46	76.4	1.01	39.70	38.38	1.03	

3.6 Conclusiones

Este capítulo ha introducido las características relacionadas con el desarrollo de un modelo numérico, para reproducir el comportamiento de las columnas de acero inoxidable ante fenómenos de inestabilidad, donde se modelizaron y compararon con resultados experimentales obtenidos de la literatura.

Se han analizado aspectos relevantes como el número de elementos finitos, el método de análisis numérico implementado para reproducir el comportamiento del material y las condiciones reales de un ensayo en laboratorio.

El modelo numérico representa de manera adecuada los modelos experimentales realizados en laboratorio, por lo cual se considera que el modelo es una herramienta válida para iniciar el estudio paramétrico.

4 ESTUDIO PARAMÉTRICO

4.1 Introducción

Este capítulo tiene como objetivo abordar una investigación numérica sobre el comportamiento de pandeo por flexión de miembros de columnas de sección hueca rectangular (SHS - RHS), sometidos a una carga axial y momento flector uniforme, donde las relaciones de momento final varían mediante la aplicación de una carga axial con diferentes excentricidades.

El estudio se basa en el análisis de resistencia a pandeo por flexión de acuerdo al código EN1993-1-4 [9], y las últimas propuestas de cálculo de la predicción de la resistencia a pandeo por flexión, utilizando el continuous strength method (CSM) en elementos de secciones huecas rectangulares.

La finalidad del estudio paramétrico es obtener resultados que permitan valorar la eficiencia de los procedimientos de cálculo, y siendo el caso poder superar las deficiencias de los métodos actuales.

4.2 Descripción de la metodología para el estudio paramétrico

La metodología de análisis será utilizada para buscar reglas de diseño en columnas sometidas a cargas combinadas de compresión más flexión.

El procedimiento se describe a continuación:

- I. Primero. _ Se seleccionarán los tamaños de las secciones transversales y los grados del material a modelar, cuyas secciones deberán ser estándar con respecto a otros estudios, para poder garantizar la confiabilidad de la investigación. Se seleccionarán varias longitudes de columnas para cubrir un rango de esbelteces.
- II. Segundo. _ Se desarrollarán modelos de elementos finitos de columnas con las propiedades seleccionadas y se someterán a un rango de relaciones de carga axial aplicada a momento de flexión, a partir de las cuales se determinarán las cargas de falla N_u y M_u .
- III. Tercero. _ Se recopilará la información y se realizarán gráficas comparativas de las curvas de interacción del código EN1993-1-4 [9], y las propuestas del continuous strength method (CSM).

4.3 Definición del estudio paramétrico

4.3.1 Propiedades geométricas

Para el estudio numérico se propone utilizar una sección hueca rectangular de dimensiones 60x60 mm, con diferentes espesores de la pared de la sección transversal y la longitud del elemento.

La nomenclatura se dispone de la siguiente manera:

Cada elemento se representa como “S1-A-CC”, donde la primera letra representa el tipo de material, siendo la letra “S” los elementos con material austenítico, la letra “Z” los elementos con material dúplex y la letra “F” los elementos con material ferrítico. Se propone utilizar 4 tipos de longitudes diferentes de 430 mm, 560 mm, 825 mm y 1100 mm. La segunda letra representa el espesor de la pared de la sección transversal del elemento, siendo A= 3 mm, B= 3.5 mm, C= 4 mm y D= 4.5 mm. La tercera letra simboliza la disposición de la carga, ya sea CC para elementos sometidos a una carga concéntrica (compresión pura), o EC para elementos sometidos a carga excéntrica (momento de flexión), siendo EC1= 6mm, EC2= 9mm, EC3= 12mm, EC4= 15mm y EC5= 18mm. En la Tabla 12 se muestran las propiedades geométricas de las secciones y en la Figura 17 se definen los símbolos.

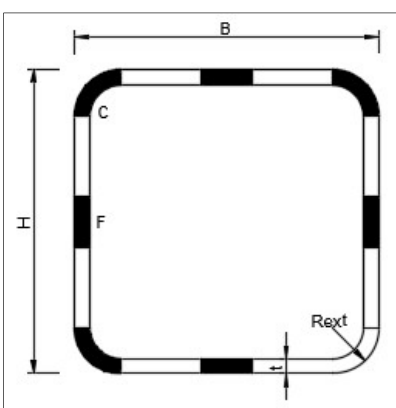


Figura 17 Definición de símbolos para las propiedades geométricas y mecánicas de las secciones.

Tabla 12 Propiedades geométricas de los elementos a carga concéntrica

Elementos			L	H	B	t	R _{ext}
Austeníticos	Dúplex	Ferríticos	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
S1-A-CC	Z1-A-CC	F1-A-CC	430	60	60	3.0	9.00
S2-A-CC	Z2-A-CC	F2-A-CC	560	60	60	3.0	9.00
S3-A-CC	Z3-A-CC	F3-A-CC	825	60	60	3.0	9.00
S4-A-CC	Z4-A-CC	F4-A-CC	1100	60	60	3.0	9.00
S1-B-CC	Z1-B-CC	F1-B-CC	430	60	60	3.5	10.50
S2-B-CC	Z2-B-CC	F2-B-CC	560	60	60	3.5	10.50
S3-B-CC	Z3-B-CC	F3-B-CC	825	60	60	3.5	10.50
S4-B-CC	Z4-B-CC	F4-B-CC	1100	60	60	3.5	10.50
S1-C-CC	Z1-C-CC	F1-C-CC	430	60	60	4.0	12.00
S2-C-CC	Z2-C-CC	F2-C-CC	560	60	60	4.0	12.00
S3-C-CC	Z3-C-CC	F3-C-CC	825	60	60	4.0	12.00
S4-C-CC	Z4-C-CC	F4-C-CC	1100	60	60	4.0	12.00
S1-D-CC	Z1-D-CC	F1-D-CC	430	60	60	4.5	13.50
S2-D-CC	Z2-D-CC	F2-D-CC	560	60	60	4.5	13.50
S3-D-CC	Z3-D-CC	F3-D-CC	825	60	60	4.5	13.50
S4-D-CC	Z4-D-CC	F4-D-CC	1100	60	60	4.5	13.50

Las secciones escogidas corresponden a una sección clase 1, de acuerdo a los límites establecidos por el código EN1993-1-4 [9], y el manual de diseño de acero inoxidable [1], los cuales se exponen en la sección 2.3.1 del capítulo 2.

La razón por la cual se consideró solo secciones clase 1, es porque el continuous strength method (CSM) muestra mayor eficiencia y exactitud para elementos robustos que para elementos esbeltos, sin embargo, para garantizar la confiabilidad de la investigación, también se incluirán resultados de otros autores, los cuales contienen secciones clase 1, clase 2 y clase 3. La información referente a los estudios experimentales adicionales, se exponen en la sección 2.7 del capítulo 2. Los resultados proporcionados de investigaciones realizadas por otros autores se incluirán en el resultado del estudio paramétrico.

4.3.2 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del material se han obtenido de la investigación para la estandarización de las propiedades del material para acero inoxidable de secciones huecas realizado por S. Afshan, O. Zhao y I. Gardner [27], se han definido propiedades mecánicas para las regiones planas y para las regiones de las esquinas de las secciones transversales. Se presentan los datos de la Tabla 13 a la Tabla 15, donde F representa a las propiedades de las regiones planas y C representa a las propiedades de las regiones de las esquinas.

Se representa el comportamiento del material en las regiones planas y las regiones de las esquinas de las secciones transversales de los elementos de la Figura 18 a la Figura 20, donde se puede distinguir el rango plástico a partir de la tensión correspondiente a una deformación del 0.2%.

Tabla 13 Propiedades mecánicas del acero inoxidable austenítico [27].

Región	E [MPa]	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	σ_u [MPa]	ϵ_u (%)	n	m
F	200000	460	700	20	7.1	2.9
C	200000	640	830	20	6.4	7.1

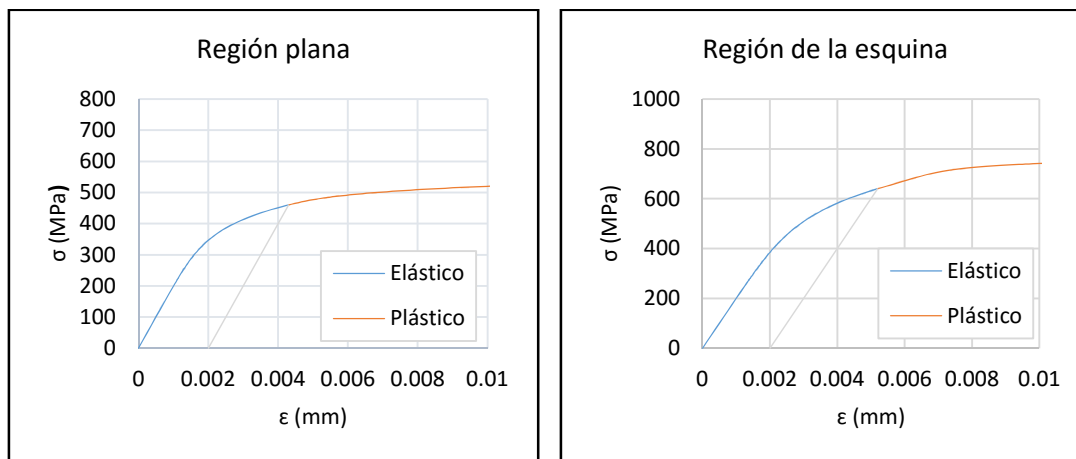


Figura 18 Comportamiento en las regiones de la sección transversal del acero inoxidable austenítico.

Tabla 14 Propiedades mecánicas del acero inoxidable dúplex [27].

Región	E [MPa]	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	σ_u [MPa]	ϵ_u (%)	n	m
Z1-F	200000	630	780	13	7.5	4.8
Z1-C	200000	800	980	3	6.1	6.7

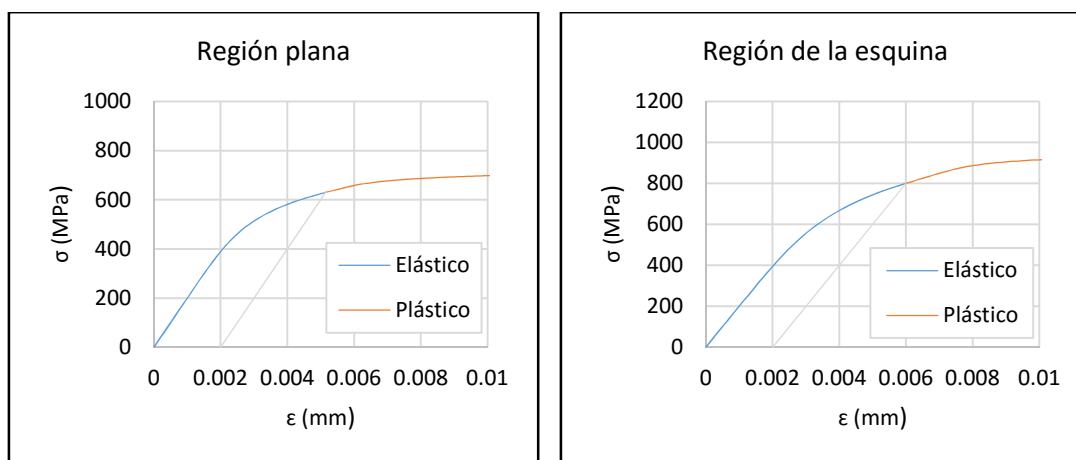


Figura 19 Comportamiento en las regiones de la sección transversal del acero inoxidable dúplex.

Tabla 15 Propiedades mecánicas del acero inoxidable ferrítico [27].

Región	E [MPa]	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	σ_u [MPa]	ϵ_u (%)	n	m
F1-F	200000	430	490	6	11.5	4.60
F1-C	200000	560	610	1	5.7	6.80

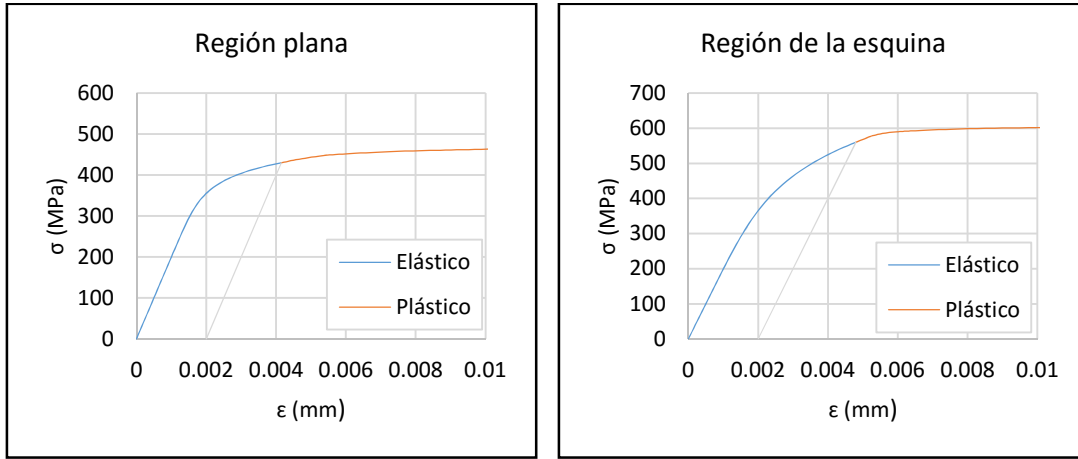


Figura 20 Comportamiento en las regiones de la sección transversal del acero ferrítico.

El comportamiento diferente de las regiones de las esquinas y de las regiones planas de las secciones transversales de los elementos, se pueden considerar en el análisis de los resultados experimentales determinando las propiedades promedio ponderadas del material, según lo establecido por Hradil y Talja [23]. Las propiedades se ponderan en función del área de la sección de las esquinas y la sección de las regiones planas con respecto al área total de la sección transversal ecuación (4.1), las propiedades del material promedio se muestran en la Tabla 16, Tabla 17 y Tabla 18.

$$\sigma = \frac{A_f \cdot \sigma_f + A_c \cdot \sigma_c}{A_f + A_c} \quad (4.1)$$

Tabla 16 Propiedades mecánicas promedio del acero inoxidable austenítico.

Elemento	E [MPa]	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	σ_u [MPa]	ϵ_u (%)	n	m
60X600X3	200000	499	728	20	6.9	3.8
60X60X3.5	200000	507	734	20	6.9	4.0
60X60X4	200000	514	739	20	6.9	4.2
60X60X4.5	200000	523	745	20	6.9	4.4

Tabla 17 Propiedades mecánicas promedio del acero inoxidable dúplex.

Elemento	E [MPa]	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	σ_u [MPa]	ϵ_u (%)	n	m
60X600X3	200000	667	824	10.8	7.2	5.2
60X60X3.5	200000	674	832	10.4	7.1	5.3
60X60X4	200000	681	840	10.0	7.1	5.4
60X60X4.5	200000	689	850	9.5	7.0	5.5

Tabla 18 Propiedades mecánicas promedio del acero inoxidable ferrítico.

Elemento	E [MPa]	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	σ_u [MPa]	ϵ_u (%)	n	m
60X600X3	200000	458	516	4.9	10.2	5.1
60X60X3.5	200000	464	521	4.7	10.0	5.2
60X60X4	200000	469	526	4.5	9.8	5.3
60X60X4.5	200000	475	532	4.2	9.5	5.4

4.3.3 Imperfecciones geométricas

Las imperfecciones se examinaron considerando la amplitud de L/1500, cuyo valor ha sido validado como el más adecuado y real para perfiles con características similares, esta afirmación se basa en estudios previos realizados por otros autores [28][26]. La incorporación de las imperfecciones geométricas globales son imprescindibles para garantizar un resultado real, por lo cual se han considerado las imperfecciones globales, de acuerdo a la Tabla 19. No se consideran las imperfecciones locales, debido a que las influencias de las imperfecciones locales son mínimas en las secciones clase 1.

Tabla 19 Imperfecciones geométricas de los elementos

Elementos			w_g (L/1500) [mm]
Austeníticos	Dúplex	Ferríticos	
S1-A	Z1-A	F1-A	0.29
S2-A	Z2-A	F2-A	0.37
S3-A	Z3-A	F3-A	0.55
S4-A	Z4-A	F4-A	0.73
S1-B	Z1-B	F1-B	0.29
S2-B	Z2-B	F2-B	0.37
S3-B	Z3-B	F3-B	0.55
S4-B	Z4-B	F4-B	0.73
S1-C	Z1-C	F1-C	0.29
S2-C	Z2-C	F2-C	0.37
S3-C	Z3-C	F3-C	0.55
S4-C	Z4-C	F4-C	0.73
S1-D	Z1-D	F1-D	0.29
S2-D	Z2-D	F2-D	0.37
S3-D	Z3-D	F3-D	0.55
S4-D	Z4-D	F4-D	0.73

4.4 Desarrollo de modelos de elementos finitos

En esta sección se presenta el estudio en el programa de elementos finitos Abaqus. El objetivo es generar un estudio paramétrico y obtener datos de rendimiento estructural. Se ha utilizado el modelo numérico validado en el capítulo 3, y se ha mantenido todos los criterios descritos en la sección 3.4.1.

El estudio consiste en realizar un análisis no lineal del material y no lineal geométrico del elemento, a través del cual, se determinará la carga última de cada modelo sometido a una carga axial con diferentes excentricidades. Los resultados numéricos de los elementos sometidos bajo una carga de compresión pura y carga combinada, se informa en la Tabla 20 a la Tabla 22, donde N_u es la carga de compresión última, δ_u es la deflexión lateral en el centro del vano del elemento, M_{u2} es el momento flector de segundo orden, el cual se obtiene de la multiplicación de la deflexión lateral del centro del vano por la carga de compresión última ($M_u = N_u \times \delta_u$).

Tabla 20 Resultados del análisis de elementos finitos (austeníticos).

Elemento	e_0 [mm]	N_u [kN]	δ_u [mm]	M_{u2} [kN.m]	Elemento	e_0 [mm]	N_u [kN]	δ_u [mm]	M_{u2} [kN.m]
S1-A-CC	0	352.85	2.01	0.71	S2-A-CC	0	328.26	4.02	1.32
S1-A-EC1	6	276.01	5.51	1.52	S2-A-EC1	6	256.73	6.33	1.63
S1-A-EC2	9	253.44	5.39	1.37	S2-A-EC2	9	235.38	8.06	1.90
S1-A-EC3	12	234.32	6.23	1.46	S2-A-EC3	12	217.27	9.37	2.04
S1-A-EC4	15	218.11	6.77	1.48	S2-A-EC4	15	202.38	10.21	2.07
S1-A-EC5	18	204.10	7.04	1.44	S2-A-EC5	18	189.62	10.67	2.02
S3-A-CC	0	278.37	5.57	1.55	S4-A-CC	0	238.30	5.66	1.35
S3-A-EC1	6	217.97	11.66	2.54	S4-A-EC1	6	182.70	14.63	2.67
S3-A-EC2	9	200.02	12.88	2.58	S4-A-EC2	9	167.36	16.29	2.73
S3-A-EC3	12	185.06	15.07	2.79	S4-A-EC3	12	155.27	19.08	2.96
S3-A-EC4	15	173.03	15.05	2.60	S4-A-EC4	15	145.21	20.87	3.03
S3-A-EC5	18	161.91	17.26	2.79	S4-A-EC5	18	136.60	21.83	2.98
S1-B-CC	0	413.73	2.73	1.13	S2-B-CC	0	383.97	4.01	1.54
S1-B-EC1	6	322.36	5.58	1.80	S2-B-EC1	6	298.93	6.44	1.92
S1-B-EC2	9	294.40	6.95	2.05	S2-B-EC2	9	273.88	8.20	2.25
S1-B-EC3	12	273.05	6.29	1.72	S2-B-EC3	12	253.46	9.42	2.39
S1-B-EC4	15	254.05	6.84	1.74	S2-B-EC4	15	235.67	8.39	1.98
S1-B-EC5	18	237.49	7.12	1.69	S2-B-EC5	18	220.30	9.24	2.04
S3-B-CC	0	323.17	5.55	1.79	S4-B-CC	0	274.99	5.67	1.56
S3-B-EC1	6	252.27	11.90	3.00	S4-B-EC1	6	210.07	14.96	3.14
S3-B-EC2	9	231.32	13.14	3.04	S4-B-EC2	9	192.35	16.65	3.20
S3-B-EC3	12	214.25	14.57	3.12	S4-B-EC3	12	178.43	19.45	3.47
S3-B-EC4	15	199.38	13.87	2.77	S4-B-EC4	15	166.86	21.23	3.54
S3-B-EC5	18	187.10	17.50	3.27	S4-B-EC5	18	156.94	22.16	3.48

Elemento	e_0 [mm]	N_u [kN]	δ_u [mm]	M_{u2} [kN.m]	Elemento	e_0 [mm]	N_u [kN]	δ_u [mm]	M_{u2} [kN.m]
S1-C-CC	0	475.20	2.72	1.29	S2-C-CC	0	439.33	4.02	1.77
S1-C-EC1	6	368.52	5.65	2.08	S2-C-EC1	6	340.53	6.58	2.24
S1-C-EC2	9	339.13	5.51	1.87	S2-C-EC2	9	311.72	8.38	2.61
S1-C-EC3	12	312.83	6.37	1.99	S2-C-EC3	12	287.32	9.71	2.79
S1-C-EC4	15	290.59	6.92	2.01	S2-C-EC4	15	267.05	10.55	2.82
S1-C-EC5	18	270.29	7.22	1.95	S2-C-EC5	18	249.85	10.97	2.74
S3-C-CC	0	366.83	5.55	2.03	S4-C-CC	0	309.33	6.56	2.03
S3-C-EC1	6	285.35	12.20	3.48	S4-C-EC1	6	235.90	15.36	3.62
S3-C-EC2	9	261.42	13.46	3.52	S4-C-EC2	9	215.96	17.07	3.69
S3-C-EC3	12	241.66	15.69	3.79	S4-C-EC3	12	200.37	19.90	3.99
S3-C-EC4	15	225.12	17.09	3.85	S4-C-EC4	15	187.40	21.66	4.06
S3-C-EC5	18	211.16	17.81	3.76	S4-C-EC5	18	176.15	22.56	3.97
S1-D-CC	0	536.80	2.76	1.48	S2-D-CC	0	494.35	4.06	2.01
S1-D-EC1	6	414.21	5.77	2.39	S2-D-EC1	6	381.19	6.72	2.56
S1-D-EC2	9	378.48	5.71	2.16	S2-D-EC2	9	348.66	8.57	2.99
S1-D-EC3	12	349.03	6.56	2.29	S2-D-EC3	12	321.22	9.91	3.18
S1-D-EC4	15	325.60	7.04	2.29	S2-D-EC4	15	298.37	10.74	3.21
S1-D-EC5	18	302.49	7.33	2.22	S2-D-EC5	18	278.84	11.15	3.11
S3-D-CC	0	409.52	5.44	2.23	S4-D-CC	0	343.53	5.62	1.93
S3-D-EC1	6	317.29	12.49	3.96	S4-D-EC1	6	260.22	15.76	4.10
S3-D-EC2	9	290.36	13.79	4.00	S4-D-EC2	9	238.04	17.50	4.17
S3-D-EC3	12	268.19	16.04	4.30	S4-D-EC3	12	220.81	20.35	4.49
S3-D-EC4	15	249.64	17.43	4.35	S4-D-EC4	15	206.50	22.10	4.56
S3-D-EC5	18	234.04	18.11	4.24	S4-D-EC5	18	194.13	22.95	4.46

Tabla 21 Resultados del análisis de elementos finitos (dúplex).

Elemento	e_0 [mm]	N_u [kN]	δ_u [mm]	M_{u2} [kN.m]	Elemento	e_0 [mm]	N_u [kN]	δ_u [mm]	M_{u2} [kN.m]
Z1-A-CC	0	457.19	2.01	0.92	Z2-A-CC	0	422.42	3.47	1.46
Z1-A-EC1	6	353.68	5.45	1.93	Z2-A-EC1	6	326.61	7.65	2.50
Z1-A-EC2	9	323.11	5.37	1.74	Z2-A-EC2	9	298.36	8.04	2.40
Z1-A-EC3	12	298.14	6.22	1.86	Z2-A-EC3	12	275.14	9.35	2.57
Z1-A-EC4	15	276.92	6.77	1.88	Z2-A-EC4	15	255.88	10.19	2.61
Z1-A-EC5	18	258.60	7.05	1.82	Z2-A-EC5	18	239.30	10.66	2.55
Z3-A-CC	0	353.40	5.20	1.84	Z4-A-CC	0	291.65	6.32	1.84
Z3-A-EC1	6	270.99	11.63	3.15	Z4-A-EC1	6	220.10	16.73	3.68
Z3-A-EC2	9	247.70	15.08	3.73	Z4-A-EC2	9	201.66	19.02	3.84
Z3-A-EC3	12	229.35	15.02	3.45	Z4-A-EC3	12	187.40	22.27	4.17
Z3-A-EC4	15	213.93	16.43	3.52	Z4-A-EC4	15	175.47	24.36	4.27
Z3-A-EC5	18	200.63	17.19	3.45	Z4-A-EC5	18	165.27	25.48	4.21

Elemento	e_0 [mm]	N_u [kN]	δ_u [mm]	M_{u2} [kN.m]	Elemento	e_0 [mm]	N_u [kN]	δ_u [mm]	M_{u2} [kN.m]
Z1-B-CC	0	532.28	2.63	1.40	Z2-B-CC	0	490.02	4.22	2.07
Z1-B-EC1	6	409.97	5.53	2.27	Z2-B-EC1	6	377.31	7.78	2.93
Z1-B-EC2	9	373.77	5.47	2.04	Z2-B-EC2	9	344.21	8.18	2.81
Z1-B-EC3	12	344.73	6.28	2.17	Z2-B-EC3	12	317.45	9.50	3.02
Z1-B-EC4	15	320.18	6.84	2.19	Z2-B-EC4	15	295.00	10.34	3.05
Z1-B-EC5	18	298.77	7.12	2.13	Z2-B-EC5	18	275.78	10.78	2.97
Z3-B-CC	0	406.83	5.22	2.12	Z4-B-CC	0	332.89	6.35	2.11
Z3-B-EC1	6	310.77	11.87	3.69	Z4-B-EC1	6	250.66	17.10	4.29
Z3-B-EC2	9	284.15	15.38	4.37	Z4-B-EC2	9	229.65	19.43	4.46
Z3-B-EC3	12	262.89	15.30	4.02	Z4-B-EC3	12	213.45	22.71	4.85
Z3-B-EC4	15	245.18	16.70	4.10	Z4-B-EC4	15	199.90	24.78	4.95
Z3-B-EC5	18	229.86	17.44	4.01	Z4-B-EC5	18	188.26	25.87	4.87
Z1-C-CC	0	606.80	2.61	1.59	Z2-C-CC	0	556.16	4.22	2.35
Z1-C-EC1	6	464.98	5.62	2.61	Z2-C-EC1	6	426.16	7.94	3.38
Z1-C-EC2	9	425.21	5.49	2.33	Z2-C-EC2	9	388.21	8.36	3.24
Z1-C-EC3	12	389.92	6.42	2.50	Z2-C-EC3	12	357.90	9.69	3.47
Z1-C-EC4	15	361.79	6.95	2.52	Z2-C-EC4	15	332.42	10.53	3.50
Z1-C-EC5	18	337.49	9.13	3.08	Z2-C-EC5	18	310.56	10.95	3.40
Z3-C-CC	0	457.90	5.24	2.40	Z4-C-CC	0	370.99	6.38	2.37
Z3-C-EC1	6	348.37	13.96	4.86	Z4-C-EC1	6	278.69	17.55	4.89
Z3-C-EC2	9	318.42	15.74	5.01	Z4-C-EC2	9	255.32	22.84	5.83
Z3-C-EC3	12	294.36	15.64	4.60	Z4-C-EC3	12	237.30	23.23	5.51
Z3-C-EC4	15	274.44	17.03	4.67	Z4-C-EC4	15	222.23	25.29	5.62
Z3-C-EC5	18	257.14	17.74	4.56	Z4-C-EC5	18	209.25	26.33	5.51
Z1-D-CC	0	680.20	2.64	1.79	Z2-D-CC	0	620.80	4.23	2.62
Z1-D-EC1	6	518.48	5.74	2.97	Z2-D-EC1	6	473.24	8.11	3.84
Z1-D-EC2	9	471.08	7.21	3.39	Z2-D-EC2	9	430.47	8.55	3.68
Z1-D-EC3	12	433.49	6.55	2.84	Z2-D-EC3	12	396.51	9.89	3.92
Z1-D-EC4	15	401.83	7.08	2.85	Z2-D-EC4	15	368.01	10.72	3.95
Z1-D-EC5	18	374.92	9.25	3.47	Z2-D-EC5	18	343.50	11.13	3.82
Z3-D-CC	0	506.78	5.26	2.66	Z4-D-CC	0	406.43	6.42	2.61
Z3-D-EC1	6	383.84	14.30	5.49	Z4-D-EC1	6	304.63	18.00	5.48
Z3-D-EC2	9	350.64	16.12	5.65	Z4-D-EC2	9	279.16	23.40	6.53
Z3-D-EC3	12	323.90	15.99	5.18	Z4-D-EC3	12	259.39	23.75	6.16
Z3-D-EC4	15	301.88	17.37	5.24	Z4-D-EC4	15	242.94	25.79	6.27
Z3-D-EC5	18	282.73	18.04	5.10	Z4-D-EC5	18	228.72	26.79	6.13

Tabla 22 Resultados del análisis de elementos finitos (ferrítico).

Elemento	e_0 [mm]	N_u [kN]	δ_u [mm]	M_{u2} [kN.m]	Elemento	e_0 [mm]	N_u [kN]	δ_u [mm]	M_{u2} [kN.m]
F1-A-CC	0	308.53	1.59	0.49	F2-A-CC	0	291.62	2.44	0.71
F1-A-EC1	6	240.78	3.24	0.78	F2-A-EC1	6	227.95	5.05	1.15
F1-A-EC2	9	220.43	4.03	0.89	F2-A-EC2	9	207.63	6.46	1.34
F1-A-EC3	12	203.31	4.66	0.95	F2-A-EC3	12	191.38	5.53	5.53
F1-A-EC4	15	188.80	5.06	0.96	F2-A-EC4	15	177.84	6.03	1.07
F1-A-EC5	18	176.36	5.27	0.93	F2-A-EC5	18	166.06	8.55	1.42
F3-A-CC	0	254.78	4.45	1.13	F4-A-CC	0	222.54	5.04	1.12
F3-A-EC1	6	199.25	8.26	1.64	F4-A-EC1	6	170.19	12.52	2.13
F3-A-EC2	9	181.96	10.73	1.95	F4-A-EC2	9	155.40	16.34	2.54
F3-A-EC3	12	167.76	9.95	1.67	F4-A-EC3	12	144.00	15.86	2.28
F3-A-EC4	15	156.24	10.88	1.70	F4-A-EC4	15	134.54	17.34	2.33
F3-A-EC5	18	146.14	11.38	1.66	F4-A-EC5	18	126.35	18.14	2.29
F1-B-CC	0	360.09	1.62	0.58	F2-B-CC	0	339.85	2.51	0.85
F1-B-EC1	6	279.40	3.29	0.92	F2-B-EC1	6	263.97	5.14	1.36
F1-B-EC2	9	255.37	4.10	1.05	F2-B-EC2	9	240.14	6.57	1.58
F1-B-EC3	12	235.31	4.71	1.11	F2-B-EC3	12	221.11	5.63	1.24
F1-B-EC4	15	216.42	6.94	1.50	F2-B-EC4	15	205.25	6.13	1.26
F1-B-EC5	18	199.38	9.14	1.82	F2-B-EC5	18	191.64	8.65	1.66
F3-B-CC	0	294.97	5.06	1.49	F4-B-CC	0	255.18	5.04	1.29
F3-B-EC1	6	229.47	8.43	1.93	F4-B-EC1	6	194.74	12.80	2.49
F3-B-EC2	9	209.53	10.95	2.29	F4-B-EC2	9	177.99	16.68	2.97
F3-B-EC3	12	192.94	10.14	1.96	F4-B-EC3	12	164.74	16.17	2.66
F3-B-EC4	15	179.63	11.07	1.99	F4-B-EC4	15	153.92	17.64	2.72
F3-B-EC5	18	167.91	11.55	1.94	F4-B-EC5	18	144.48	18.42	2.66
F1-C-CC	0	411.67	1.62	0.67	F2-C-CC	0	387.54	2.62	1.02
F1-C-EC1	6	317.27	3.34	1.06	F2-C-EC1	6	299.00	5.26	1.57
F1-C-EC2	9	289.70	4.18	1.21	F2-C-EC2	9	271.75	6.71	1.82
F1-C-EC3	12	266.59	4.81	1.28	F2-C-EC3	12	249.78	5.75	1.44
F1-C-EC4	15	247.23	5.21	1.29	F2-C-EC4	15	231.64	6.25	1.45
F1-C-EC5	18	230.64	5.41	1.25	F2-C-EC5	18	216.39	8.79	1.90
F3-C-CC	0	334.07	4.90	1.64	F4-C-CC	0	285.94	5.08	1.45
F3-C-EC1	6	258.35	8.63	2.23	F4-C-EC1	6	217.66	13.13	2.86
F3-C-EC2	9	235.79	11.22	2.64	F4-C-EC2	9	199.12	17.10	3.40
F3-C-EC3	12	216.85	10.36	2.25	F4-C-EC3	12	184.07	16.54	3.04
F3-C-EC4	15	201.79	11.29	2.28	F4-C-EC4	15	171.93	18.00	3.10
F3-C-EC5	18	188.50	11.75	2.22	F4-C-EC5	18	161.26	18.75	3.02

Elemento	e_0 [mm]	N_u [kN]	δ_u [mm]	M_{u2} [kN.m]	Elemento	e_0 [mm]	N_u [kN]	δ_u [mm]	M_{u2} [kN.m]
F1-D-CC	0	463.08	1.62	0.75	F2-D-CC	0	434.75	2.70	1.17
F1-D-EC1	6	354.28	3.41	1.21	F2-D-EC1	6	333.03	5.37	1.79
F1-D-EC2	9	323.06	4.27	1.38	F2-D-EC2	9	302.39	6.86	2.08
F1-D-EC3	12	297.09	4.91	1.46	F2-D-EC3	12	277.46	7.95	2.21
F1-D-EC4	15	276.59	5.27	1.46	F2-D-EC4	15	257.17	8.61	2.22
F1-D-EC5	18	256.43	5.49	1.41	F2-D-EC5	18	240.16	8.93	2.15
F3-D-CC	0	371.90	4.79	1.78	F4-D-CC	0	315.11	5.95	1.87
F3-D-EC1	6	285.86	8.85	2.53	F4-D-EC1	6	239.09	13.47	3.22
F3-D-EC2	9	260.75	11.48	2.99	F4-D-EC2	9	218.85	17.52	3.83
F3-D-EC3	12	239.43	10.59	2.54	F4-D-EC3	12	202.13	16.91	3.42
F3-D-EC4	15	222.68	11.51	2.56	F4-D-EC4	15	188.75	18.36	3.47
F3-D-EC5	18	207.84	15.11	3.14	F4-D-EC5	18	176.92	19.07	3.37

Los resultados para diferentes excentricidades de la carga axial, se representa de la Figura 21 a la Figura 32, donde la respuesta del elemento sometido a una carga axial se obtiene a través de un análisis no lineal del material y no linealidad geométrica, realizado en el programa de elementos finitos Abaqus, las figuras muestran el desplazamiento lateral del elemento medido en el centro del vano frente a la acción de una carga axial, y el comportamiento del momento de flexión de segundo orden frente a la carga axial aplicada para diferentes excentricidades. En esta sección se muestran los resultados de los elementos SHS 60X60X3 mm; las curvas de todos los elementos se encuentran en el Anexo 1.

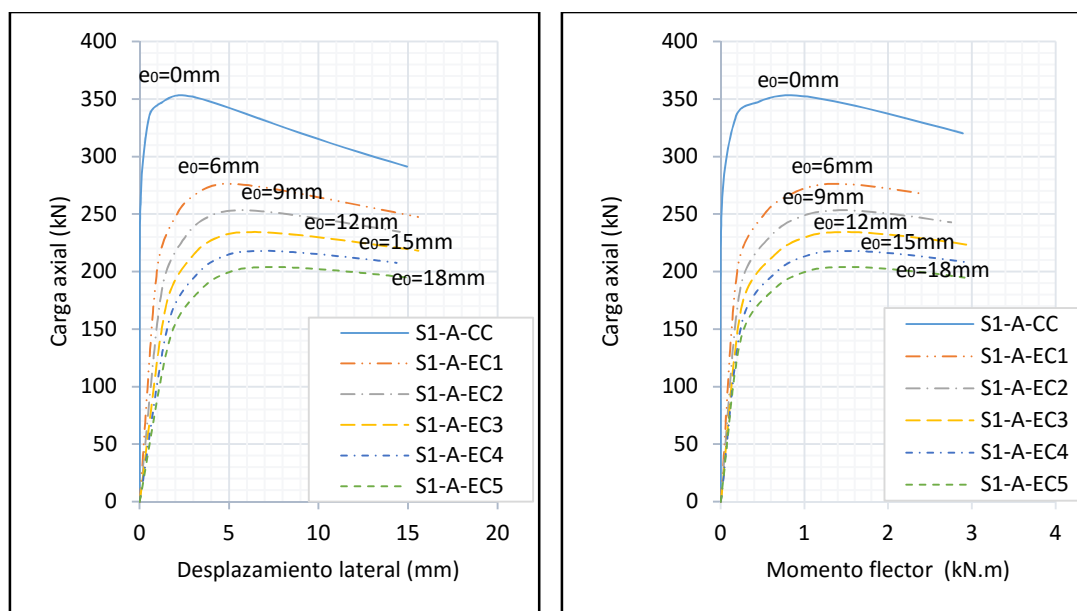


Figura 21 Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S1-A austeníticos).

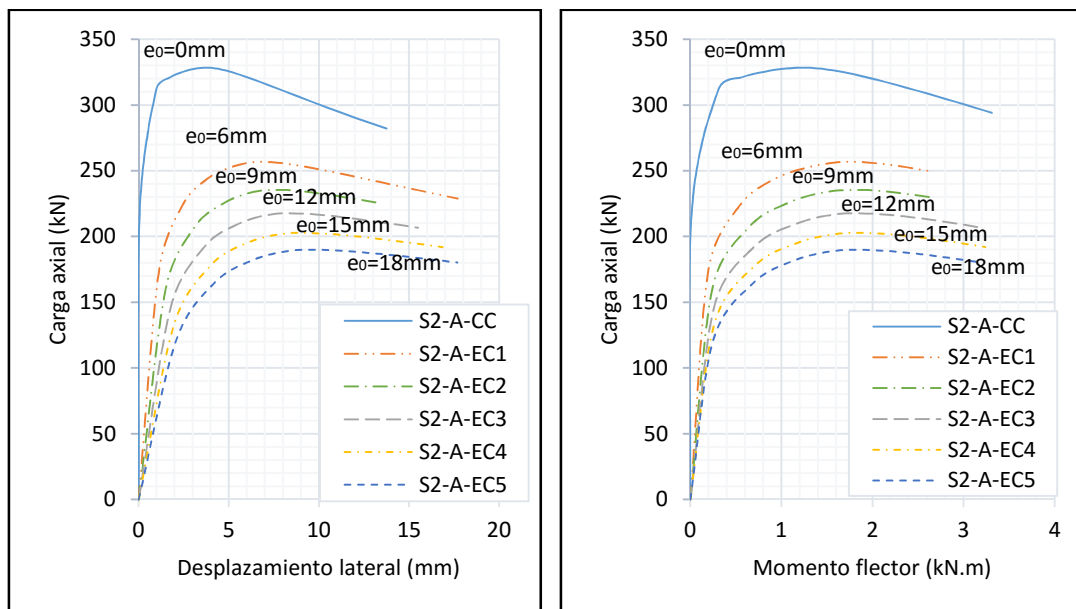


Figura 22 Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S2-A austeníticos).

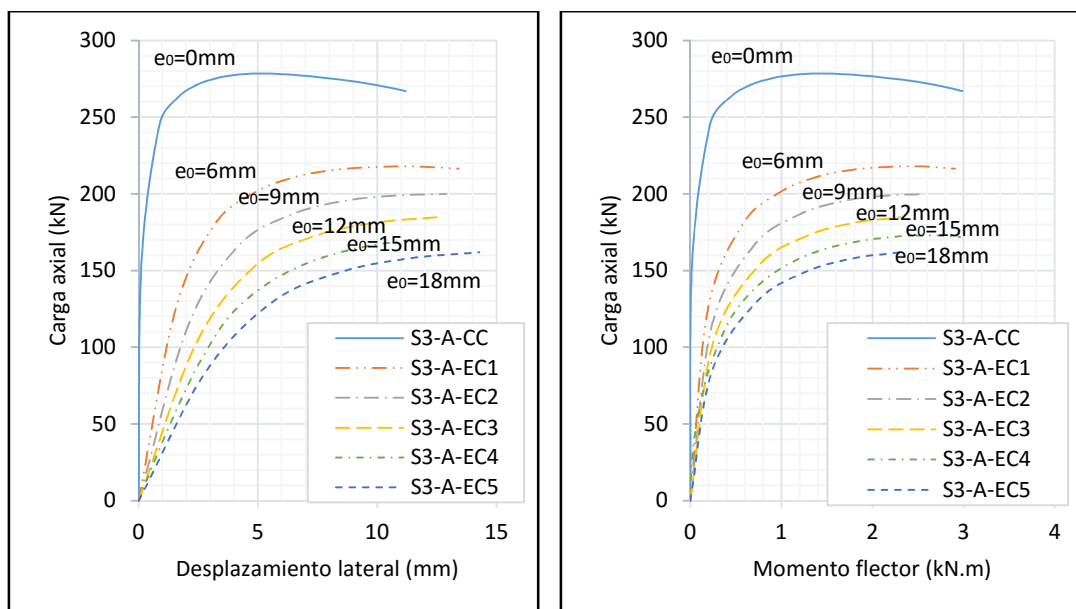


Figura 23 Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S3-A austeníticos).

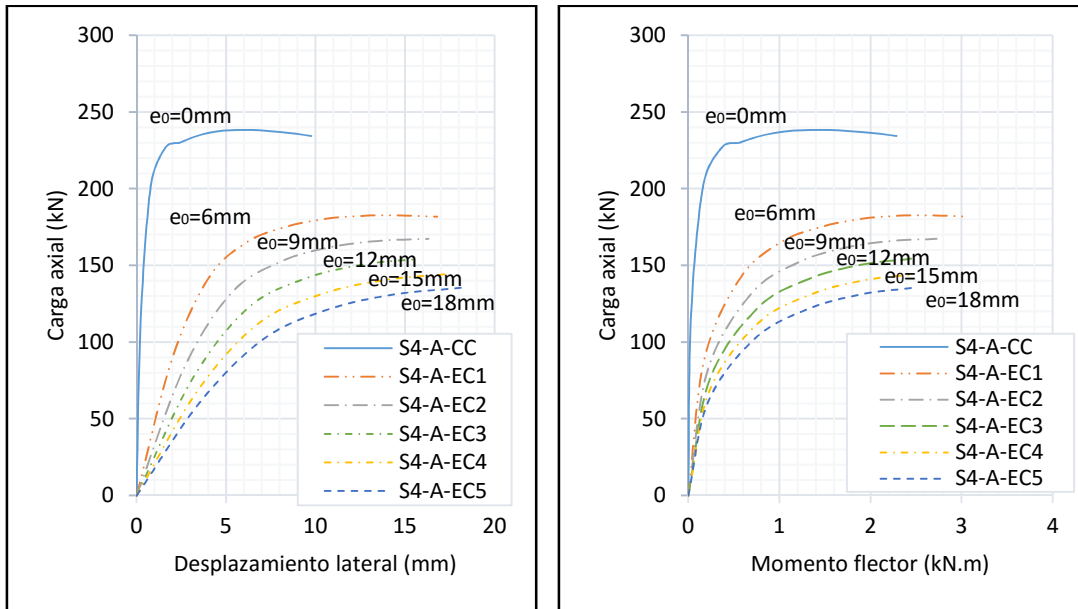


Figura 24 Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S4-A austeníticos).

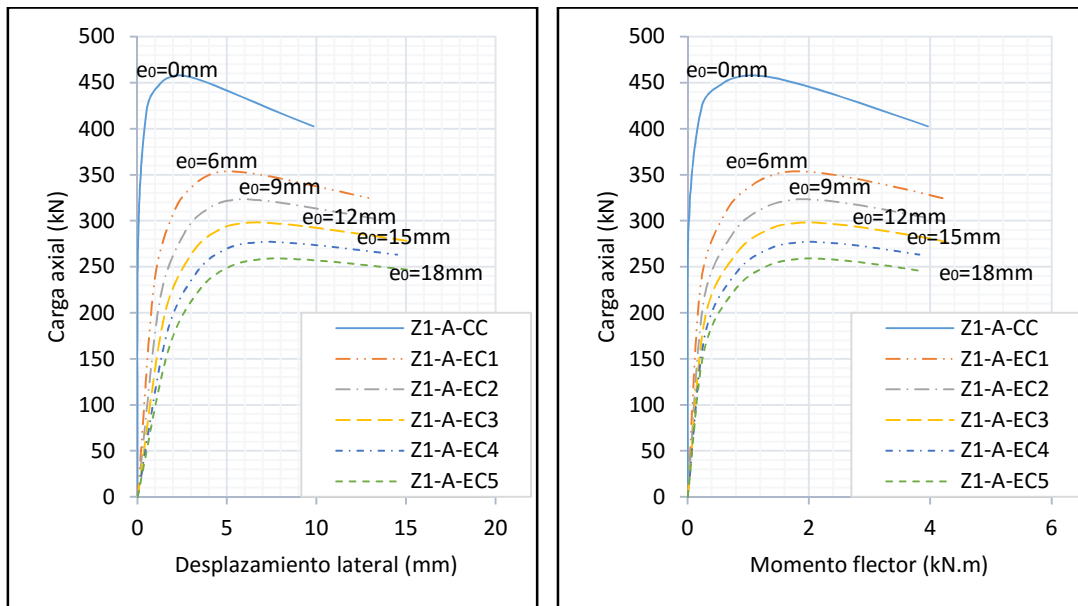


Figura 25 Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z1-A dúplex).

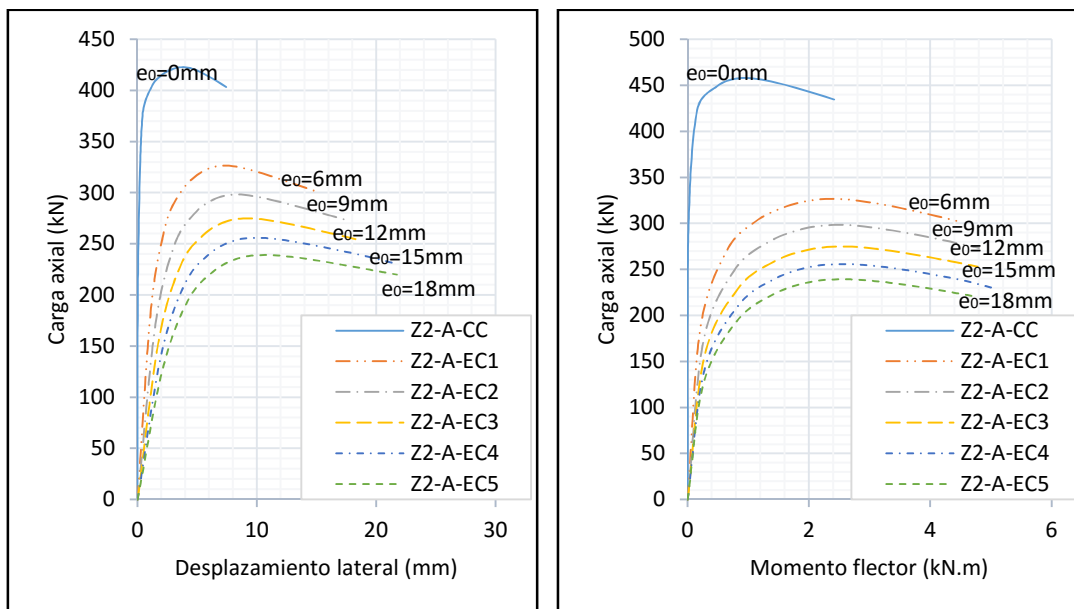


Figura 26 Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z2-A dúplex).

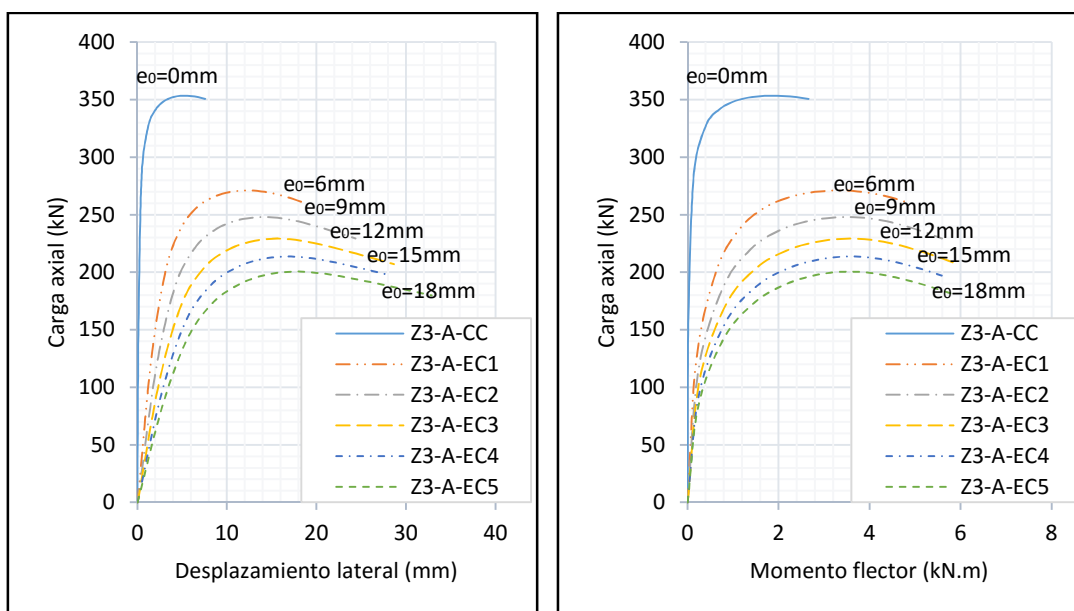


Figura 27 Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z3-A dúplex).

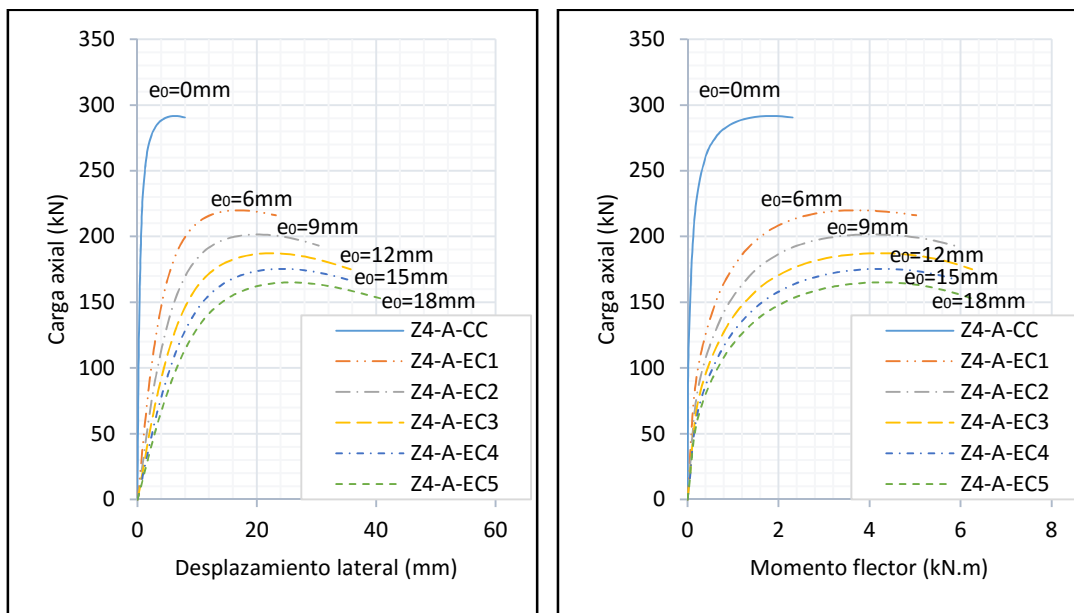


Figura 28 Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z4-A dúplex).

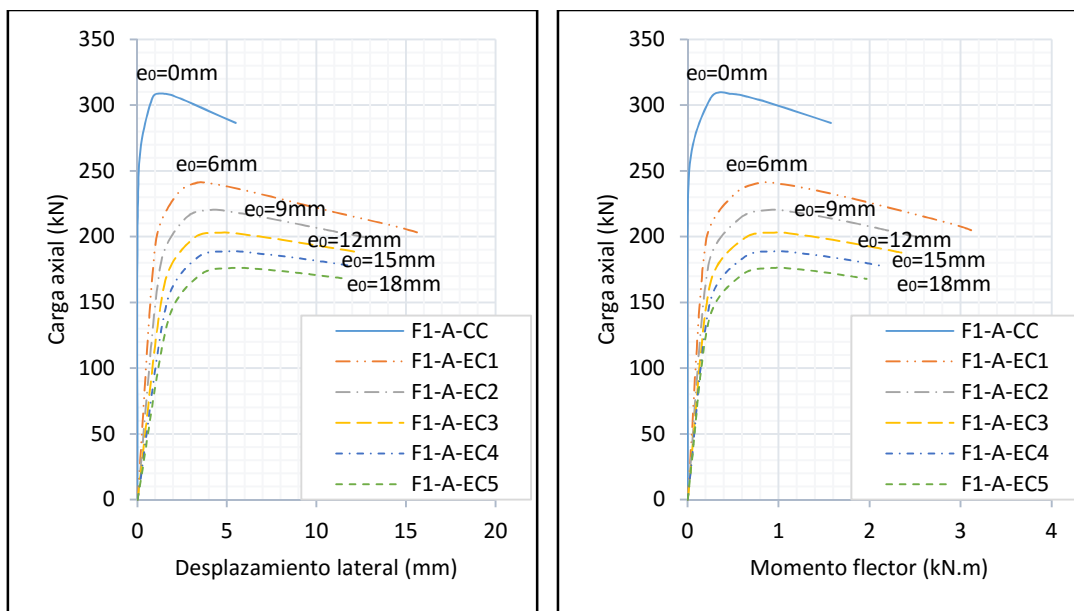


Figura 29 Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F1-A ferrítico).

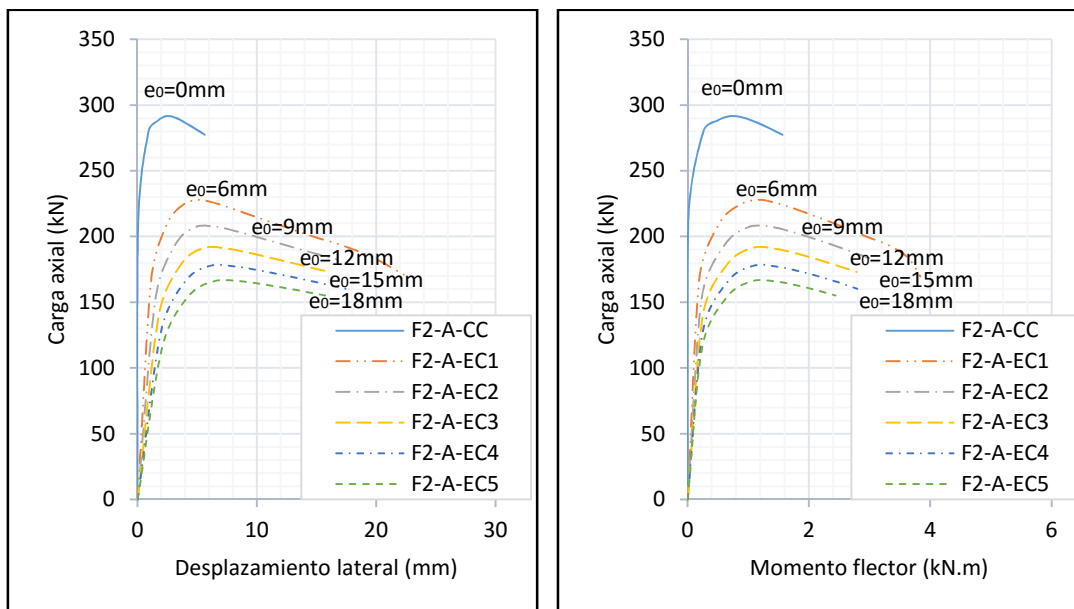


Figura 30 Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F2-A ferrítico).

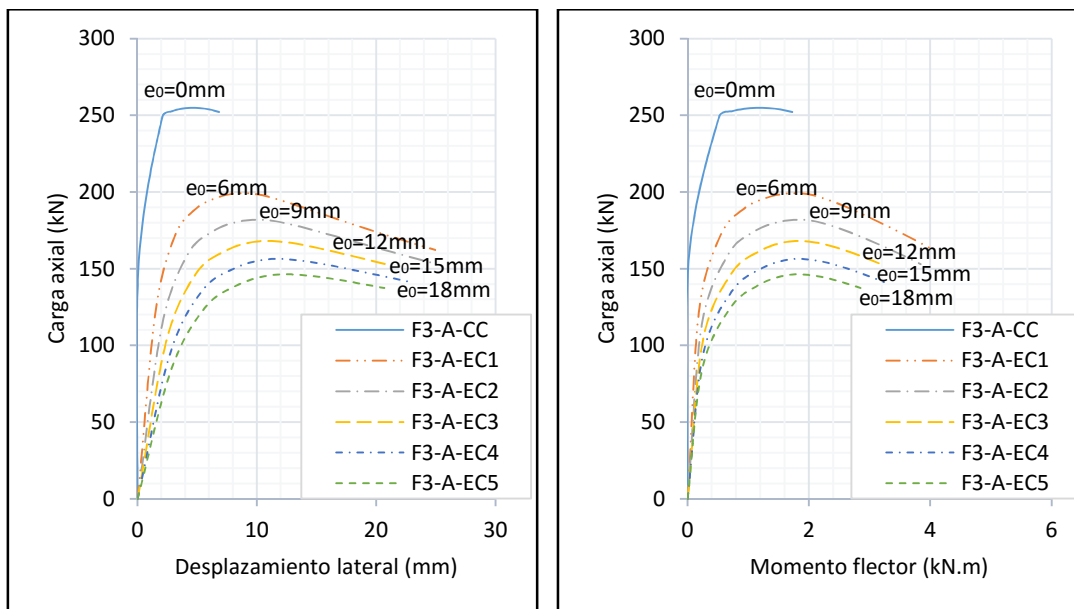


Figura 31 Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F3-A ferrítico).

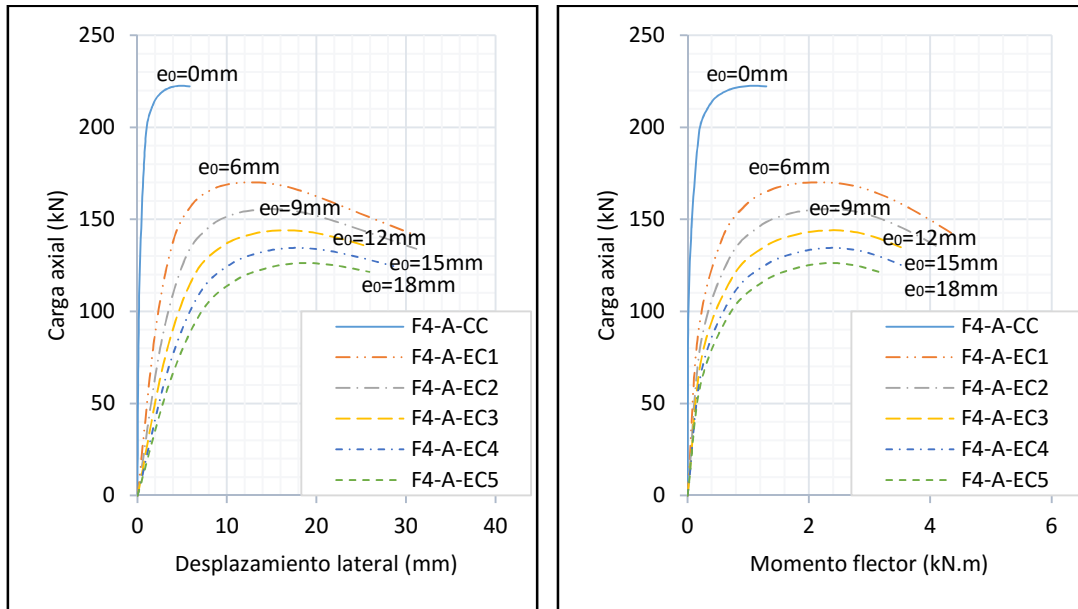


Figura 32 Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F4-A ferrítico).

4.5 Conclusiones

Este capítulo presentó una investigación numérica sobre los elementos de sección hueca rectangular. El estudio se centró en el comportamiento de pandeo por flexión en condiciones de carga aislada y carga combinada, es decir, compresión más flexión.

Se expuso un total de 96 modelos para cada tipo de acero inoxidable, para lo cual se utilizó una gama variada de longitudes de los elementos y diferentes espesores de la sección transversal. El resultado de la investigación fue la curva de carga axial frente al desplazamiento lateral, y carga axial frente al momento flector de cada elemento. La información recopilada permitió conocer el comportamiento de un elemento durante el proceso del pandeo por flexión, debido a una carga axial concéntrica y excéntrica.

5 ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL PANDEO POR FLEXIÓN CON EL CSM

5.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es realizar una exposición de la resistencia a flexión a carga axial y la interacción carga axial más momento flector, considerando las especificaciones de diseño del código EN1993-1-4 [9], y la teoría del continuous strength method CSM, para lo cual se utilizarán los resultados obtenidos del estudio paramétrico expuestos en el capítulo 4.

Se presentarán los resultados obtenidos del estudio de elementos sometidos a compresión pura y a compresión más flexión con las resistencias de los métodos actuales, y las nuevas propuestas para el cálculo de la resistencia al pandeo por flexión.

5.2 Resultados elementos concéntricos

Se realiza una presentación entre los resultados numéricos y las resistencias pronosticadas por el código EN1993-1-4 [9], cuyas expresiones se explican en la sección 2.3.2, así como las últimas propuestas de cálculo considerando el continuous strength method (CSM), cuyas expresiones se explican en la sección 2.5.4. El factor γ_{M1} se tomó con el valor de 1.0, debido a que se desea conocer la predicción característica de la resistencia, para poder valorar su eficiencia.

Los resultados se muestran de la Tabla 23 a la Tabla 25, donde N_u corresponde a la carga última obtenida del análisis de elementos finitos en el programa Abaqus y N_{Ed} corresponde a la resistencia de diseño establecida por el código EN1993-1-4 [9], y la teoría del continuous strength method CSM, la predicción de la resistencia $N_{Ed(EN1993-1-4)}$ para el código EN1993-1-4 se determina con la ecuación (2.12), la predicción de la resistencia $N_{Ed(csm)}$ para el CSM se determina con la ecuación (2.38).

Tabla 23 Resultados modelos concéntricos (austeníticos).

Elemento		N_u [kN]	Código EN1993-1-4	Continuous strength method (CMS)
			$N_{Ed(EN1993-1-4)}$ [kN]	$N_{Ed(csm)}$ [kN]
SHS 60X60X3	S1-A-CC	352.85	309.95	332.35
	S2-A-CC	328.26	293.60	310.70
	S3-A-CC	278.37	257.20	264.45
	S4-A-CC	238.30	215.70	216.00
SHS 60X60X3.5	S1-B-CC	413.73	358.40	414.15
	S2-B-CC	383.97	339.00	363.60
	S3-B-CC	323.17	295.50	319.10
	S4-B-CC	279.99	246.20	254.40
SHS 60X60X4	S1-C-CC	475.20	405.35	487.15
	S2-C-CC	439.33	382.70	448.00
	S3-C-CC	366.83	331.90	366.40
	S4-C-CC	309.33	274.60	287.30
SHS 60X60X4.5	S1-D-CC	536.80	452.25	537.85
	S2-D-CC	494.35	426.10	492.15
	S3-D-CC	409.52	367.40	398.55
	S4-D-CC	343.53	301.60	310.00

Tabla 24 Resultados modelos concéntricos (dúplex).

Elemento		N_u [kN]	Código EN1993-1-4	Continuous strength method (CMS)
			$N_{Ed(EN1993-1-4)}$ [kN]	$N_{Ed(csm)}$ [kN]
SHS 60X60X3	Z1-A-CC	457.19	400.40	418.30
	Z2-A-CC	422.42	374.10	388.60
	Z3-A-CC	353.40	314.90	322.60
	Z4-A-CC	291.65	250.80	253.80
SHS 60X60X3.5	Z1-B-CC	532.28	460.70	505.20
	Z2-B-CC	490.02	429.65	464.95
	Z3-B-CC	406.83	359.50	377.50
	Z4-B-CC	332.89	284.40	291.00
SHS 60X60X4	Z1-C-CC	606.80	519.00	564.50
	Z2-C-CC	556.16	482.70	516.35
	Z3-C-CC	457.90	401.40	414.30
	Z4-C-CC	370.99	315.30	316.80
SHS 60X60X4.5	Z1-D-CC	680.20	576.00	622.00
	Z2-D-CC	620.80	534.40	565.70
	Z3-D-CC	506.78	459.50	470.65
	Z4-D-CC	406.43	344.00	340.60

Tabla 25 Resultados modelos concéntricos (ferríticos).

Elemento		N_u [kN]	Código EN1993-1-4	Continuous strength method (CMS)
			$N_{Ed(EN1993-1-4)}$ [kN]	$N_{Ed(csm)}$ [kN]
SHS 60X60X3	F1-A-CC	308.53	272.50	281.50
	F2-A-CC	291.62	258.90	266.30
	F3-A-CC	254.78	229.20	233.40
	F4-A-CC	222.54	195.70	197.30
SHS 60X60X3.5	F1-B-CC	360.09	314.20	338.00
	F2-B-CC	339.85	298.20	303.60
	F3-B-CC	294.80	263.00	260.60
	F4-B-CC	255.18	223.30	229.80
SHS 60X60X4	F1-C-CC	411.67	354.60	361.70
	F2-C-CC	387.54	336.00	340.30
	F3-C-CC	334.07	295.10	294.40
	F4-C-CC	285.92	249.10	245.40
SHS 60X60X4.5	F1-D-CC	463.08	394.50	405.20
	F2-D-CC	434.75	373.20	380.20
	F3-D-CC	371.90	326.20	326.70
	F4-D-CC	315.11	273.70	270.20

5.3 Resultados elementos excéntricos

Se presentan los resultados numéricos y las resistencias pronosticadas por el código EN1993-1-4 [9], así como las resistencias determinadas con las últimas propuestas de cálculo considerando el continuous strength method (CSM), cuyas expresiones se explican en la sección 2.6.1 y 2.6.2.

Los resultados se muestran de la Tabla 26 a la Tabla 41, donde N_u corresponde a la carga última obtenida del análisis de elementos finitos en el programa Abaqus, y N_{Ed} corresponde a la resistencia de diseño establecida por el código EN1993-1-4 [9], y la teoría del continuous strength method (CSM), la predicción de la resistencia para la interacción carga axial más momento flector $N_{Ed(EN1993-1-4)}$ considerando las expresiones del código EN1993-1-4 se determina con la ecuación (2.41), la predicción de la resistencia para la interacción $N_{Ed(CSM\ O.Zhao)}$ considerando la propuesta de O. Zhao con el continuous strength method (CSM) se determina con la ecuación (2.42), la predicción de la resistencia para la interacción $N_{Ed(CSM\ Tesis)}$ considerando la propuesta de tesis con el continuous strength method (CSM) se determina con la ecuación (2.43), e_0 es la excentricidad inicial y M_{u1} es el momento de primer orden, el cual se obtiene del producto de la carga última por la excentricidad inicial ($M_{u1} = N_u \times e_0$).

Tabla 26 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X3 austeníticos).

Elemento	N_u [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM Tesis})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM O.Zhao})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{EN1993-1-4})$ [kN]	e_0 [mm]	M_{u1} [kN.m]
S1-A-EC1	276.01	251.70	238.80	230.30	6	1.66
S1-A-EC2	253.44	225.35	214.60	204.10	9	2.28
S1-A-EC3	234.32	204.15	195.30	183.15	12	2.81
S1-A-EC4	218.11	186.80	179.40	166.20	15	3.27
S1-A-EC5	204.10	172.15	165.85	152.00	18	3.67
S2-A-EC1	256.73	232.55	222.70	221.10	6	1.54
S2-A-EC2	235.38	208.20	200.20	196.85	9	2.12
S2-A-EC3	217.27	188.60	182.10	177.25	12	2.61
S2-A-EC4	202.35	172.95	167.30	161.25	15	3.04
S2-A-EC5	189.62	159.75	154.90	147.90	18	3.41
S3-A-EC1	217.97	196.20	192.25	198.90	6	1.31
S3-A-EC2	200.02	175.90	172.50	179.65	9	1.80
S3-A-EC3	185.06	160.00	157.10	163.40	12	2.22
S3-A-EC4	173.03	147.20	144.70	149.75	15	2.60
S3-A-EC5	161.91	136.55	134.50	138.15	18	2.91
S4-A-EC1	182.70	161.35	161.05	165.35	6	1.10
S4-A-EC2	167.36	145.40	145.15	149.65	9	1.51
S4-A-EC3	155.27	132.95	132.95	137.20	12	1.86
S4-A-EC4	145.21	123.05	122.85	126.90	15	2.18
S4-A-EC5	136.60	114.60	114.60	118.30	18	2.46

Tabla 27 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X3.5 austeníticos).

Elemento	N_u [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM Tesis})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM O.Zhao})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{EN1993-1-4})$ [kN]	e_0 [mm]	M_{u1} [kN.m]
S1-B-EC1	322.36	314.35	280.70	266.70	6	1.93
S1-B-EC2	294.40	281.25	253.90	236.35	9	2.65
S1-B-EC3	273.05	254.70	232.35	212.15	12	3.28
S1-B-EC4	254.05	233.45	214.15	192.50	15	3.81
S1-B-EC5	237.49	215.20	198.55	176.10	18	4.27
S2-B-EC1	298.93	273.20	258.60	255.70	6	1.79
S2-B-EC2	273.88	244.40	232.90	227.60	9	2.46
S2-B-EC3	253.46	222.00	212.10	205.30	12	3.04
S2-B-EC4	235.67	203.60	195.20	186.80	15	3.54
S2-B-EC5	220.30	188.10	181.00	171.40	18	3.97

Tabla 28 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X3.5 austeníticos).

Elemento	N_u [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM Tesis})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM O.Zhao})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{EN1993-1-4})$ [kN]	e_0 [mm]	M_{u1} [kN.m]
S3-B-EC1	252.27	238.80	224.90	228.50	6	1.51
S3-B-EC2	231.32	214.45	203.10	206.20	9	2.08
S3-B-EC3	214.25	195.45	185.80	188.30	12	2.57
S3-B-EC4	199.38	180.30	171.80	172.60	15	2.99
S3-B-EC5	187.10	167.25	159.90	159.60	18	3.37
S4-B-EC1	210.07	192.40	187.80	188.70	6	1.26
S4-B-EC2	192.35	174.00	170.00	170.90	9	1.73
S4-B-EC3	178.44	159.60	156.00	156.60	12	2.14
S4-B-EC4	166.86	148.00	144.90	145.00	15	2.50
S4-B-EC5	156.94	138.20	135.40	135.10	18	2.82

Tabla 29 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X4 austeníticos).

Elemento	N_u [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM T.})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM O.Zh.})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{EN1993-1-4})$ [kN]	e_0 [mm]	M_{u1} [kN.m]
S1-C-EC1	368.52	368.85	319.80	301.65	6	2.21
S1-C-EC2	337.79	330.35	290.30	267.75	9	3.04
S1-C-EC3	312.83	299.55	265.90	240.30	12	3.75
S1-C-EC4	290.59	274.10	245.50	218.10	15	4.36
S1-C-EC5	270.29	253.10	228.40	199.50	18	4.87
S2-C-EC1	340.53	336.90	297.80	289.20	6	2.04
S2-C-EC2	311.72	301.60	269.80	257.40	9	2.81
S2-C-EC3	287.32	273.80	247.30	232.20	12	3.45
S2-C-EC4	267.05	251.50	228.20	211.60	15	4.01
S2-C-EC5	249.85	232.30	212.50	194.10	18	4.50
S3-C-EC1	285.35	274.90	254.45	256.15	6	1.71
S3-C-EC2	261.42	247.45	230.55	231.25	9	2.35
S3-C-EC3	241.66	226.15	211.40	211.50	12	2.90
S3-C-EC4	225.12	208.45	195.95	194.85	15	3.38
S3-C-EC5	211.16	193.70	182.85	180.10	18	3.80
S4-C-EC1	235.90	219.00	211.20	210.60	6	1.42
S4-C-EC2	215.96	198.50	192.00	190.90	9	1.94
S4-C-EC3	200.37	182.40	176.60	175.00	12	2.40
S4-C-EC4	187.40	169.30	164.30	161.90	15	2.81
S4-C-EC5	176.15	158.20	153.70	151.10	18	3.17

Tabla 30 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X4.5 austeníticos).

Elemento	N_u [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM Tesis})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM O.Zhao})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{EN1993-1-4})$ [kN]	e_0 [mm]	M_{u1} [kN.m]
S1-D-EC1	414.21	406.75	355.35	337.10	6	2.49
S1-D-EC2	378.48	364.05	322.40	299.20	9	3.41
S1-D-EC3	349.03	330.05	295.25	268.55	12	4.19
S1-D-EC4	325.60	302.40	272.50	243.75	15	4.88
S1-D-EC5	302.49	278.80	253.10	223.40	18	5.44
S2-D-EC1	381.19	369.60	330.60	322.50	6	2.29
S2-D-EC2	348.66	331.20	298.95	287.50	9	3.14
S2-D-EC3	321.22	301.05	273.95	259.35	12	3.85
S2-D-EC4	298.37	276.00	253.05	235.95	15	4.48
S2-D-EC5	278.84	255.40	235.20	216.90	18	5.02
S3-D-EC1	318.29	299.80	281.35	283.40	6	1.91
S3-D-EC2	290.36	270.00	254.75	256.00	9	2.61
S3-D-EC3	268.19	246.55	233.40	233.95	12	3.22
S3-D-EC4	249.64	227.55	215.90	215.50	15	3.74
S3-D-EC5	234.04	211.70	201.45	200.25	18	4.21
S4-D-EC1	260.22	236.60	231.80	231.30	6	1.56
S4-D-EC2	238.04	215.00	210.50	209.80	9	2.14
S4-D-EC3	220.81	197.80	193.80	192.50	12	2.65
S4-D-EC4	206.50	183.40	180.30	178.30	15	3.10
S4-D-EC5	194.13	171.80	168.90	166.30	18	3.49

Tabla 31 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X3 dúplex).

Elemento	N_u [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM Tesis})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM O.Zhao})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{EN1993-1-4})$ [kN]	e_0 [mm]	M_{u1} [kN.m]
Z1-A-EC1	353.68	323.00	311.90	300.00	6	2.12
Z1-A-EC2	323.11	290.10	281.30	266.60	9	2.91
Z1-A-EC3	298.14	263.30	256.20	239.70	12	3.58
Z1-A-EC4	276.92	241.20	235.20	218.00	15	4.15
Z1-A-EC5	258.60	222.80	217.40	199.90	18	4.65
Z2-A-EC1	326.61	297.60	288.80	285.10	6	1.96
Z2-A-EC2	298.36	267.40	260.20	254.50	9	2.69
Z2-A-EC3	275.14	243.00	237.20	230.00	12	3.30
Z2-A-EC4	255.88	223.20	218.20	210.00	15	3.84
Z2-A-EC5	239.30	206.30	202.10	193.20	18	4.31

Tabla 32 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X3 dúplex).

Elemento	N_u [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM Tesis})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM O.Zhao})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{EN1993-1-4})$ [kN]	e_0 [mm]	M_{u1} [kN.m]
Z3-B-EC1	270.99	246.60	242.00	241.90	6	1.63
Z3-B-EC2	247.70	222.50	218.60	218.80	9	2.23
Z3-B-EC3	229.35	203.40	200.10	200.00	12	2.75
Z3-B-EC4	213.93	187.60	184.90	184.60	15	3.21
Z3-B-EC5	200.63	174.50	172.00	171.70	18	3.61
Z4-A-EC1	220.10	196.95	195.05	193.10	6	1.32
Z4-A-EC2	201.66	179.30	177.55	175.20	9	1.81
Z4-A-EC3	187.40	164.95	163.55	161.00	12	2.25
Z4-A-EC4	175.47	153.25	152.00	149.50	15	2.63
Z4-A-EC5	165.27	143.30	142.30	139.70	18	2.97

Tabla 33 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X3.5 dúplex).

Elemento	N_u [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM Tesis})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM O.Zhao})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{EN1993-1-4})$ [kN]	e_0 [mm]	M_{u1} [kN.m]
Z1-B-EC1	409.97	391.60	364.30	345.80	6	2.46
Z1-B-EC2	373.77	352.10	330.20	307.40	9	3.36
Z1-B-EC3	344.73	320.40	301.90	276.30	12	4.14
Z1-B-EC4	320.18	293.60	278.20	251.30	15	4.80
Z1-B-EC5	298.77	271.40	258.00	230.50	18	5.38
Z2-B-EC1	377.31	358.15	336.40	327.95	6	2.26
Z2-B-EC2	344.21	322.45	304.95	293.25	9	3.10
Z2-B-EC3	317.45	293.90	279.10	264.95	12	3.81
Z2-B-EC4	295.00	269.85	257.55	241.95	15	4.42
Z2-B-EC5	275.78	249.95	239.15	222.20	18	4.96
Z3-B-EC1	310.77	291.60	280.20	276.30	6	1.86
Z3-B-EC2	284.15	264.00	254.80	249.60	9	2.56
Z3-B-EC3	262.89	241.80	234.10	228.50	12	3.15
Z3-B-EC4	245.18	223.70	216.70	210.70	15	3.68
Z3-B-EC5	229.86	208.40	202.50	196.40	18	4.14
Z4-B-EC1	250.66	228.70	224.50	219.20	6	1.50
Z4-B-EC2	229.65	209.00	205.40	199.00	9	2.07
Z4-B-EC3	213.45	192.90	189.90	183.00	12	2.56
Z4-B-EC4	199.90	179.60	177.00	169.90	15	3.00
Z4-B-EC5	188.26	168.60	166.10	158.90	18	3.39

Tabla 34 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X4 dúplex).

Elemento	N_u [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM Tesis})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM O.Zhao})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{EN1993-1-4})$ [kN]	e_0 [mm]	M_{u1} [kN.m]
Z1-C-EC1	464.98	437.00	409.50	389.50	6	2.79
Z1-C-EC2	425.19	393.00	370.50	347.00	9	3.83
Z1-C-EC3	389.92	358.00	339.00	312.50	12	4.68
Z1-C-EC4	361.79	328.50	312.00	283.50	15	5.43
Z1-C-EC5	337.49	303.00	289.50	260.00	18	6.07
Z2-C-EC1	426.16	397.55	377.15	369.10	6	2.56
Z2-C-EC2	388.21	358.30	341.20	330.05	9	3.49
Z2-C-EC3	357.90	326.45	312.20	298.65	12	4.29
Z2-C-EC4	332.42	300.20	288.05	272.30	15	4.99
Z2-C-EC5	310.56	278.10	267.85	250.50	18	5.59
Z3-C-EC1	348.37	320.40	312.75	308.00	6	2.09
Z3-C-EC2	317.53	290.85	284.20	278.50	9	2.86
Z3-C-EC3	294.36	266.70	260.90	254.80	12	3.53
Z3-C-EC4	274.44	246.55	241.90	235.70	15	4.12
Z3-C-EC5	257.14	230.00	225.65	219.20	18	4.63
Z4-C-EC1	278.69	250.00	249.40	243.30	6	1.67
Z4-C-EC2	255.32	228.55	227.95	220.60	9	2.30
Z4-C-EC3	237.30	211.15	210.55	203.15	12	2.85
Z4-C-EC4	222.23	197.10	196.20	188.75	15	3.33
Z4-C-EC5	209.25	184.90	184.35	176.50	18	3.77

Tabla 35 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X4.5 dúplex).

Elemento	N_u [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM Tesis})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM O.Zhao})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{EN1993-1-4})$ [kN]	e_0 [mm]	M_{u1} [kN.m]
Z1-D-EC1	518.48	481.00	453.00	433.00	6	3.11
Z1-D-EC2	471.08	432.50	409.50	385.50	9	4.24
Z1-D-EC3	433.49	393.50	374.50	347.00	12	5.20
Z1-D-EC4	401.83	361.00	345.00	316.00	15	6.03
Z1-D-EC5	374.92	333.50	319.50	289.50	18	6.75
Z2-D-EC1	473.24	435.20	416.55	409.35	6	2.84
Z2-D-EC2	430.47	392.60	376.65	365.95	9	3.87
Z2-D-EC3	396.51	357.60	344.55	331.75	12	4.76
Z2-D-EC4	368.01	328.75	317.80	302.95	15	5.52
Z2-D-EC5	343.50	305.05	295.05	278.75	18	6.18

Tabla 36 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X4.5 dúplex).

Elemento	N_u [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM Tesis})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM O.Zhao})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{EN1993-1-4})$ [kN]	e_0 [mm]	M_{u1} [kN.m]
Z3-D-EC1	383.84	363.60	357.00	352.95	6	2.30
Z3-D-EC2	350.64	329.45	323.80	319.15	9	3.16
Z3-D-EC3	323.90	301.90	297.15	291.85	12	3.89
Z3-D-EC4	301.88	279.30	275.30	269.30	15	4.53
Z3-D-EC5	282.73	260.25	256.45	250.55	18	5.09
Z4-D-EC1	304.63	269.90	272.00	265.70	6	1.83
Z4-D-EC2	279.16	246.90	248.40	241.10	9	2.51
Z4-D-EC3	259.39	228.30	229.70	222.20	12	3.11
Z4-D-EC4	242.94	212.90	214.40	206.60	15	3.64
Z4-D-EC5	228.72	200.00	201.30	193.10	18	4.12

Tabla 37 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X3 ferrítico).

Elemento	N_u [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM Tesis})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM O.Zhao})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{EN1993-1-4})$ [kN]	e_0 [mm]	M_{u1} [kN.m]
F1-A-EC1	240.78	225.30	219.70	204.50	6	1.44
F1-A-EC2	220.43	204.30	199.40	182.10	9	1.98
F1-A-EC3	203.31	186.70	182.60	164.00	12	2.44
F1-A-EC4	188.80	171.50	168.30	148.90	15	2.83
F1-A-EC5	176.36	158.70	155.90	136.50	18	3.17
F2-A-EC1	227.95	211.50	206.90	197.00	6	1.37
F2-A-EC2	207.63	191.60	187.70	175.90	9	1.87
F2-A-EC3	191.38	175.20	171.90	158.90	12	2.30
F2-A-EC4	177.84	161.30	158.50	144.90	15	2.67
F2-A-EC5	166.06	149.60	147.00	133.20	18	2.99
F3-A-EC1	199.25	183.80	181.40	179.20	6	1.20
F3-A-EC2	181.96	166.80	164.80	161.70	9	1.64
F3-A-EC3	167.76	153.10	151.30	147.30	12	2.01
F3-A-EC4	156.24	141.50	139.80	135.00	15	2.34
F3-A-EC5	146.14	131.60	130.30	124.80	18	2.63
F4-A-EC1	170.19	156.10	155.10	151.70	6	1.02
F4-A-EC2	155.40	142.20	141.50	137.50	9	1.40
F4-A-EC3	144.00	130.90	130.30	126.20	12	1.73
F4-A-EC4	134.54	121.70	120.90	116.90	15	2.02
F4-A-EC5	126.35	113.60	113.10	109.10	18	2.27

Tabla 38 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X3.5 ferrítico).

Elemento	N_u [kN]	$N_{Ed(CSM \text{ Tesis})}$ [kN]	$N_{Ed(CSM \text{ O.Zhao})}$ [kN]	$N_{Ed(EN1993-1-4)}$ [kN]	e_0 [mm]	M_{u1} [kN.m]
F1-B-EC1	279.40	270.50	255.10	236.20	6	1.68
F1-B-EC2	255.37	245.40	232.80	210.00	9	2.30
F1-B-EC3	235.31	224.30	213.70	189.10	12	2.82
F1-B-EC4	218.50	206.30	197.40	172.00	15	3.28
F1-B-EC5	203.93	191.00	183.30	157.70	18	3.67
F2-B-EC1	263.97	241.30	237.80	226.90	6	1.58
F2-B-EC2	240.14	218.90	216.00	202.90	9	2.16
F2-B-EC3	221.11	200.10	198.00	183.30	12	2.65
F2-B-EC4	205.25	184.50	182.60	167.10	15	3.08
F2-B-EC5	191.64	171.10	169.40	153.70	18	3.45
F3-B-EC1	229.47	205.80	207.30	205.90	6	1.38
F3-B-EC2	209.53	186.90	188.30	185.80	9	1.89
F3-B-EC3	192.94	171.50	172.80	169.20	12	2.32
F3-B-EC4	179.63	158.70	159.60	155.40	15	2.69
F3-B-EC5	167.91	147.90	148.50	143.70	18	3.02
F4-B-EC1	194.74	182.80	178.60	172.90	6	1.17
F4-B-EC2	175.38	166.90	163.20	156.80	9	1.58
F4-B-EC3	164.74	154.10	150.90	144.00	12	1.98
F4-B-EC4	153.92	143.10	140.60	133.40	15	2.31
F4-B-EC5	144.48	134.00	131.60	124.60	18	2.60

Tabla 39 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X4 ferrítico).

Elemento	N_u [kN]	$N_{Ed(CSM \text{ Tesis})}$ [kN]	$N_{Ed(CSM \text{ O.Zhao})}$ [kN]	$N_{Ed(EN1993-1-4)}$ [kN]	e_0 [mm]	M_{u1} [kN.m]
F1-C-EC1	317.27	289.80	285.40	267.00	6	1.90
F1-C-EC2	289.70	262.90	259.20	237.30	9	2.61
F1-C-EC3	266.59	240.20	237.20	213.70	12	3.20
F1-C-EC4	247.23	221.30	218.60	194.40	15	3.71
F1-C-EC5	230.64	204.90	202.50	178.30	18	4.15
F2-C-EC1	299.00	270.40	267.90	256.00	6	1.79
F2-C-EC2	271.75	245.50	243.20	229.00	9	2.45
F2-C-EC3	249.78	224.70	222.90	206.90	12	3.00
F2-C-EC4	231.64	207.10	205.50	188.90	15	3.47
F2-C-EC5	216.39	192.10	190.70	173.50	18	3.90

Tabla 40 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X4 ferrítico).

Elemento	N_u [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM Tesis})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM O.Zhao})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{EN1993-1-4})$ [kN]	e_0 [mm]	M_{u1} [kN.m]
F3-C-EC1	258.35	232.80	233.30	230.70	6	1.55
F3-C-EC2	235.79	211.60	212.10	209.20	9	2.12
F3-C-EC3	216.85	194.30	194.50	190.80	12	2.60
F3-C-EC4	201.79	179.80	180.20	175.20	15	3.03
F3-C-EC5	188.50	167.50	167.70	162.00	18	3.39
F4-C-EC1	217.66	195.10	197.70	193.00	6	1.31
F4-C-EC2	199.12	178.30	180.40	175.20	9	1.79
F4-C-EC3	184.07	164.50	166.20	160.80	12	2.21
F4-C-EC4	170.79	153.00	154.60	149.10	15	2.56
F4-C-EC5	161.26	143.30	144.50	139.00	18	2.90

Tabla 41 Resultados modelos excéntricos (SHS 60X60X4.5 ferrítico).

Elemento	N_u [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM Tesis})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{CSM O.Zhao})$ [kN]	$N_{Ed}(\text{EN1993-1-4})$ [kN]	e_0 [mm]	M_{u1} [kN.m]
F1-D-EC1	354.28	324.10	317.40	297.10	6	2.13
F1-D-EC2	323.06	294.30	288.60	264.40	9	2.91
F1-D-EC3	297.09	268.80	264.40	238.10	12	3.57
F1-D-EC4	276.59	247.60	243.70	217.00	15	4.15
F1-D-EC5	256.43	229.30	225.70	199.10	18	4.62
F2-D-EC1	333.03	302.00	297.80	284.90	6	2.00
F2-D-EC2	302.39	274.00	270.60	254.70	9	2.72
F2-D-EC3	277.46	250.70	248.00	230.50	12	3.33
F2-D-EC4	257.17	231.50	228.60	210.20	15	3.86
F2-D-EC5	235.79	214.70	212.50	193.30	18	4.24
F3-D-EC1	280.65	258.60	258.20	255.00	6	1.68
F3-D-EC2	260.75	235.30	234.90	231.10	9	2.35
F3-D-EC3	233.56	216.00	215.70	211.70	12	2.80
F3-D-EC4	222.68	200.10	199.80	194.40	15	3.34
F3-D-EC5	207.84	186.40	186.20	180.10	18	3.74
F4-D-EC1	239.09	215.50	217.50	212.10	6	1.43
F4-D-EC2	218.85	196.70	198.60	192.30	9	1.97
F4-D-EC3	202.13	181.70	183.50	176.70	12	2.43
F4-D-EC4	188.75	169.20	170.60	163.80	15	2.83
F4-D-EC5	176.92	158.30	159.70	153.10	18	3.18

Se analiza el comportamiento de las secciones huecas rectangulares frente al fenómeno de inestabilidad, debido a una carga axial, los puntos correspondientes a la carga última se define a través de N_u y M_{u1} , donde N_u corresponde a la carga última obtenida del estudio de elementos finitos y M_{u1} es el momento último de primer orden que corresponde al producto entre la carga última y la excentricidad inicial ($M_{u1} = N_u \times e_0$).

Se presenta la curva de interacción del código EN1993-1-4 [9], y el continuous strength method (CSM), a través de la Figura 33 a la Figura 44, donde la curva de interacción correspondiente a la expresión del código EN1993-1-4 se representa en la gráfica mediante el símbolo K, la cual se determina con la ecuación (2.41), la curva de interacción correspondiente a la propuesta de O. Zhao con el continuous strength method (CSM) se representa en la gráfica a través del símbolo K_{csm} , la cual se determina con la ecuación (2.42) y la curva de interacción correspondiente a la propuesta de cálculo de la tesis con el continuous strength method (CSM) se representa con el símbolo K_{csm}^* , la cual se determina con la ecuación (2.43).

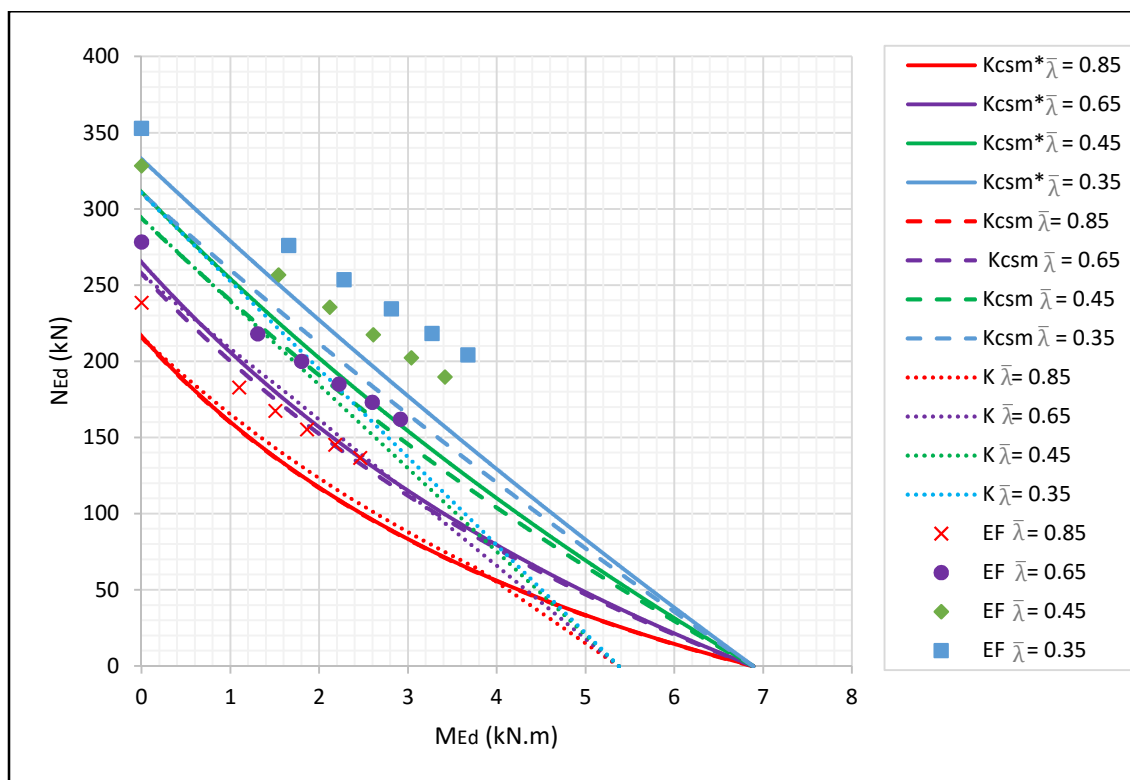


Figura 33 Curva de interacción (SHS60X60X3 austenítico).

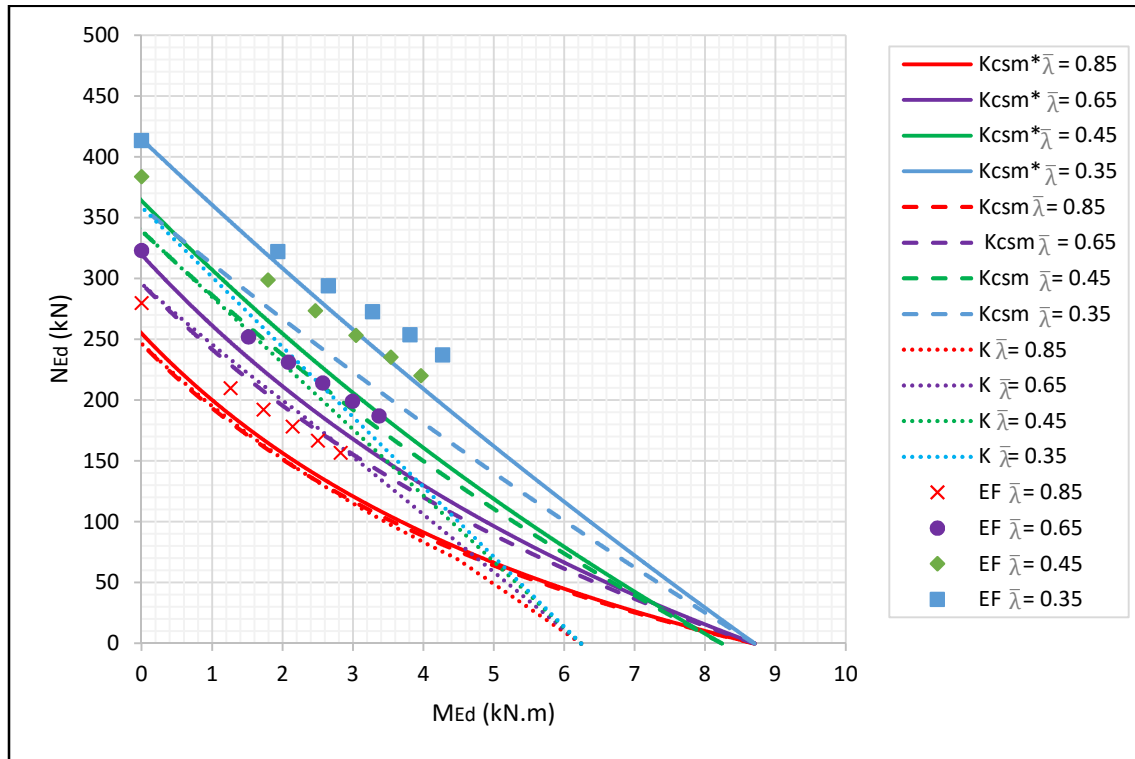


Figura 34 Curva de interacción (SHS60X60X3.5 austenítico).

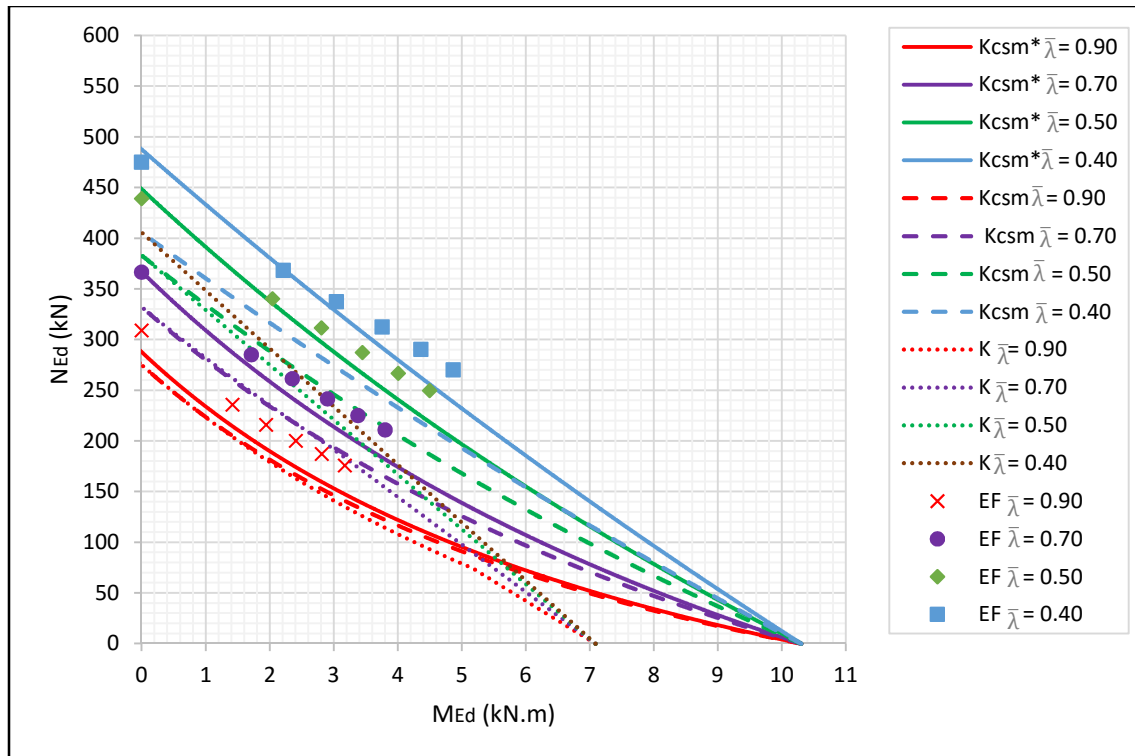


Figura 35 Curva de interacción (SHS60X60X4 austenítico).

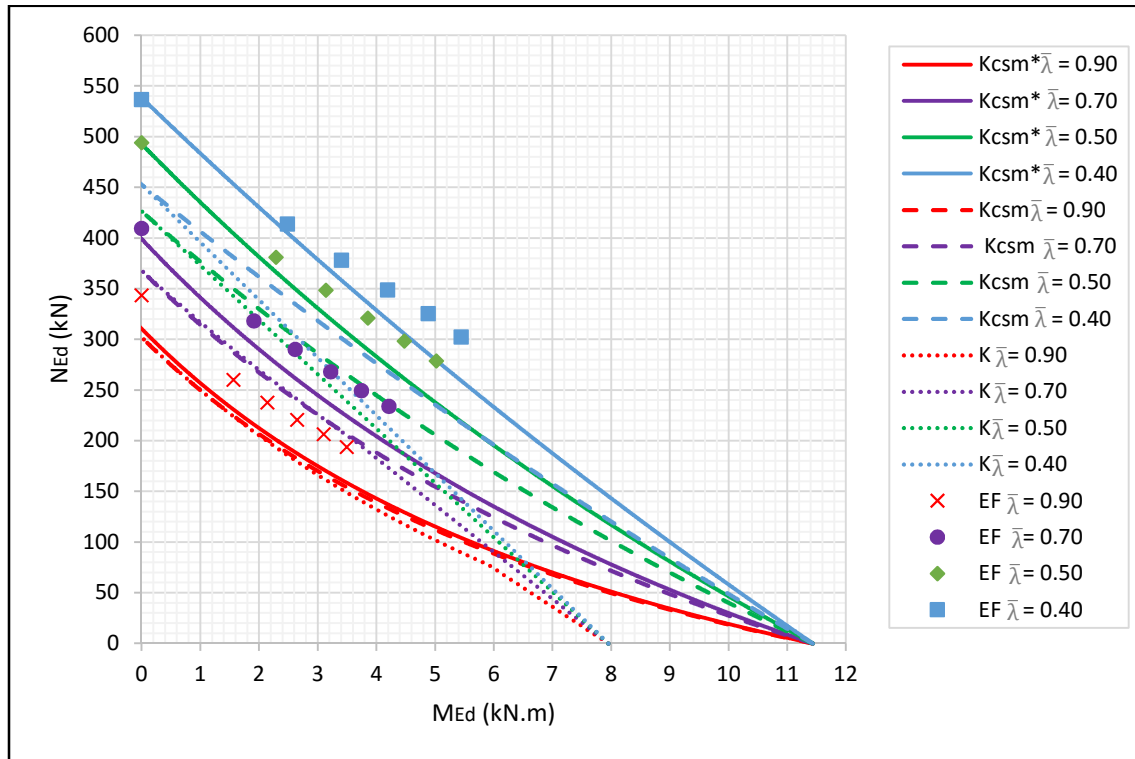


Figura 36 Curva de interacción (SHS60X60X4.5 austenítico).

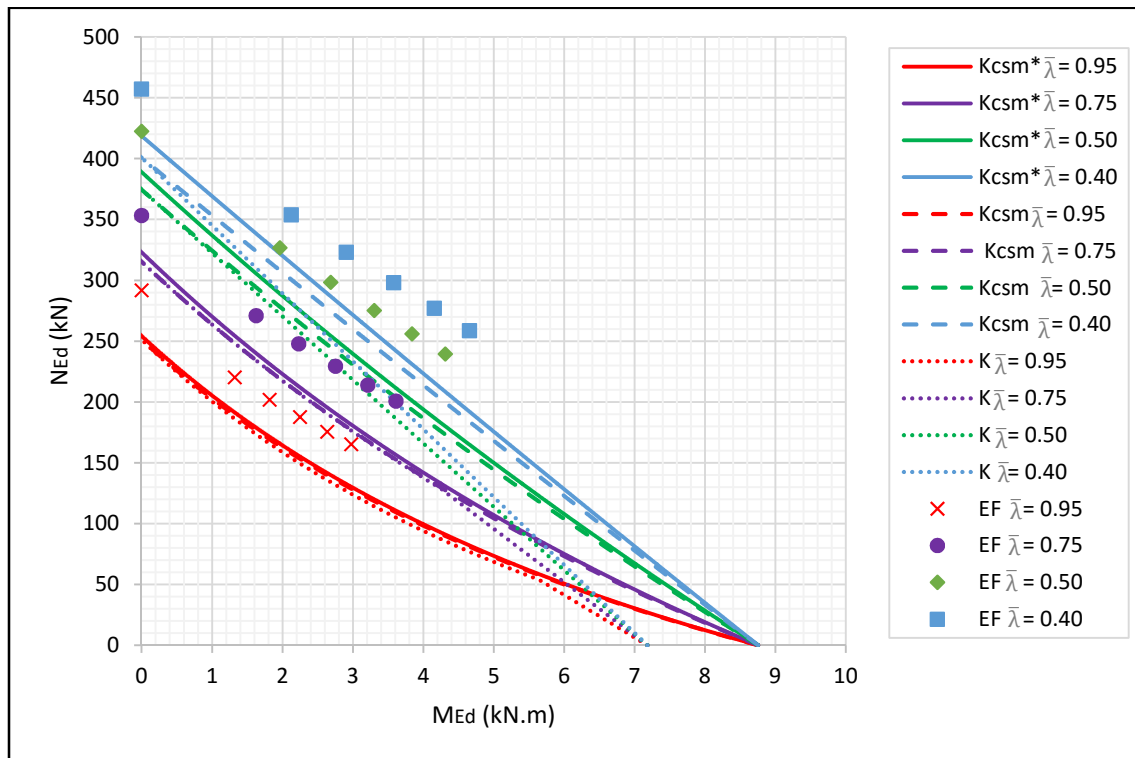


Figura 37 Curva de interacción (SHS60X60X3 dúplex).

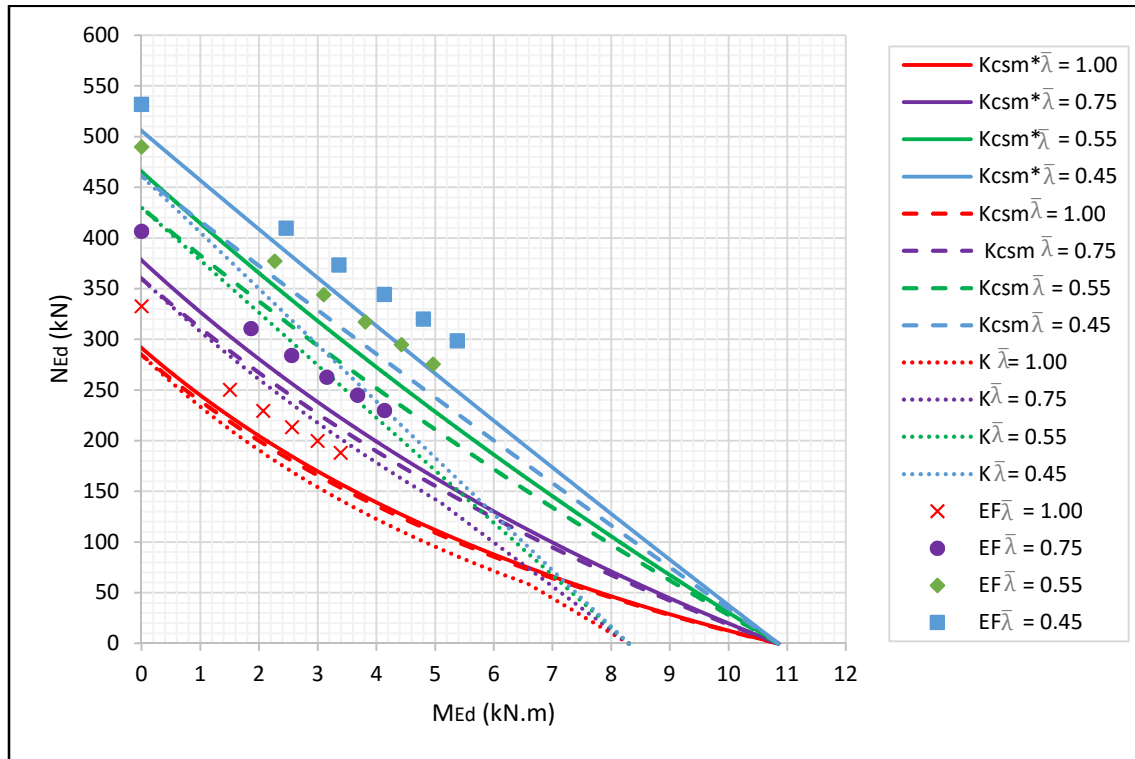


Figura 38 Curva de interacción (SHS60X60X3.5 dúplex).

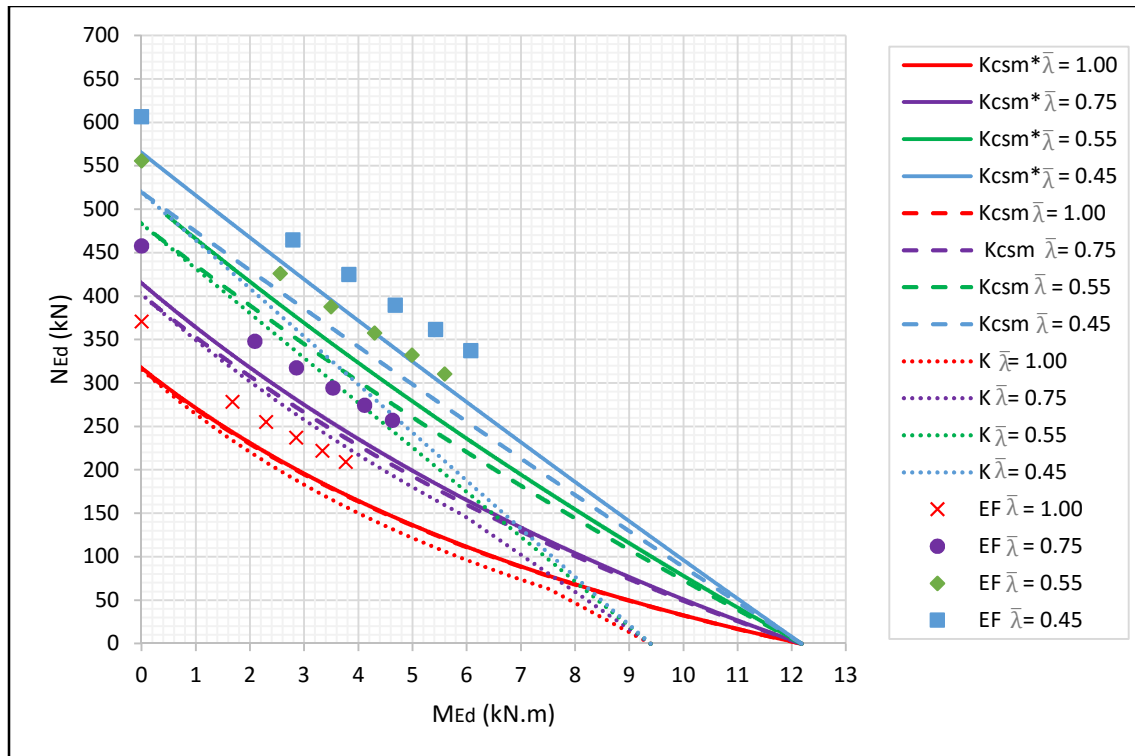


Figura 39 Curva de interacción (SHS60X60X4 dúplex).

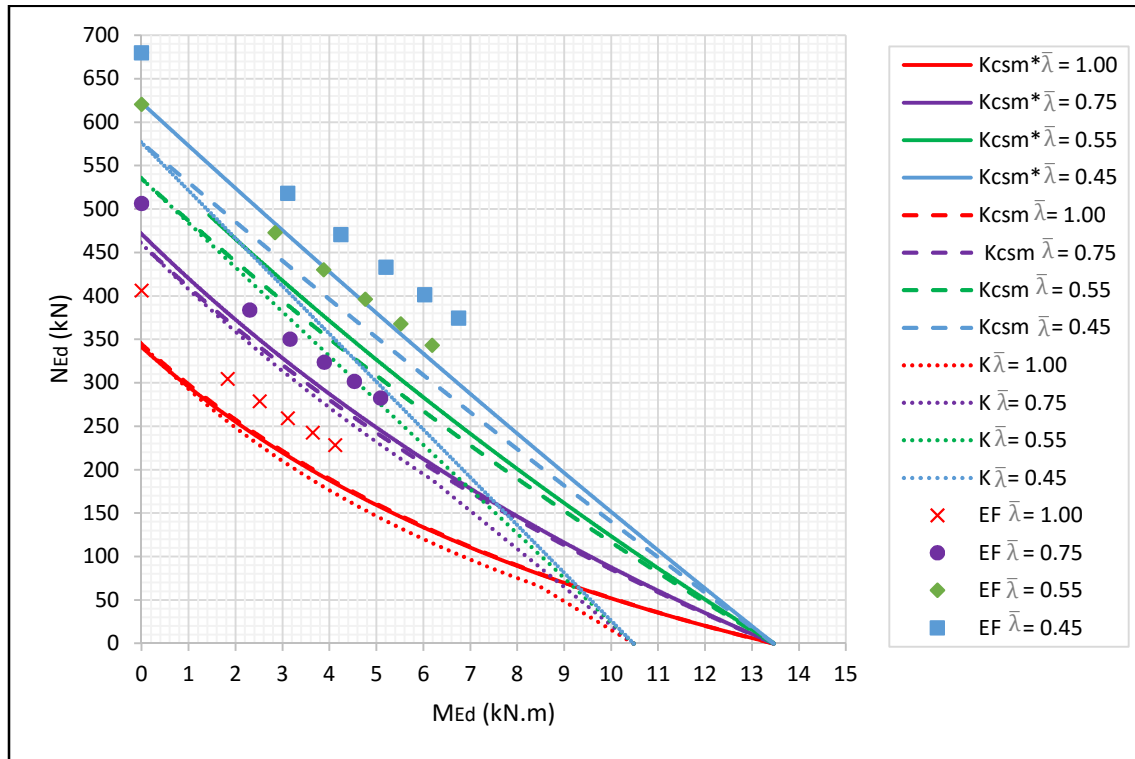


Figura 40 Curva de interacción (SHS60X60X4.5 dúplex).

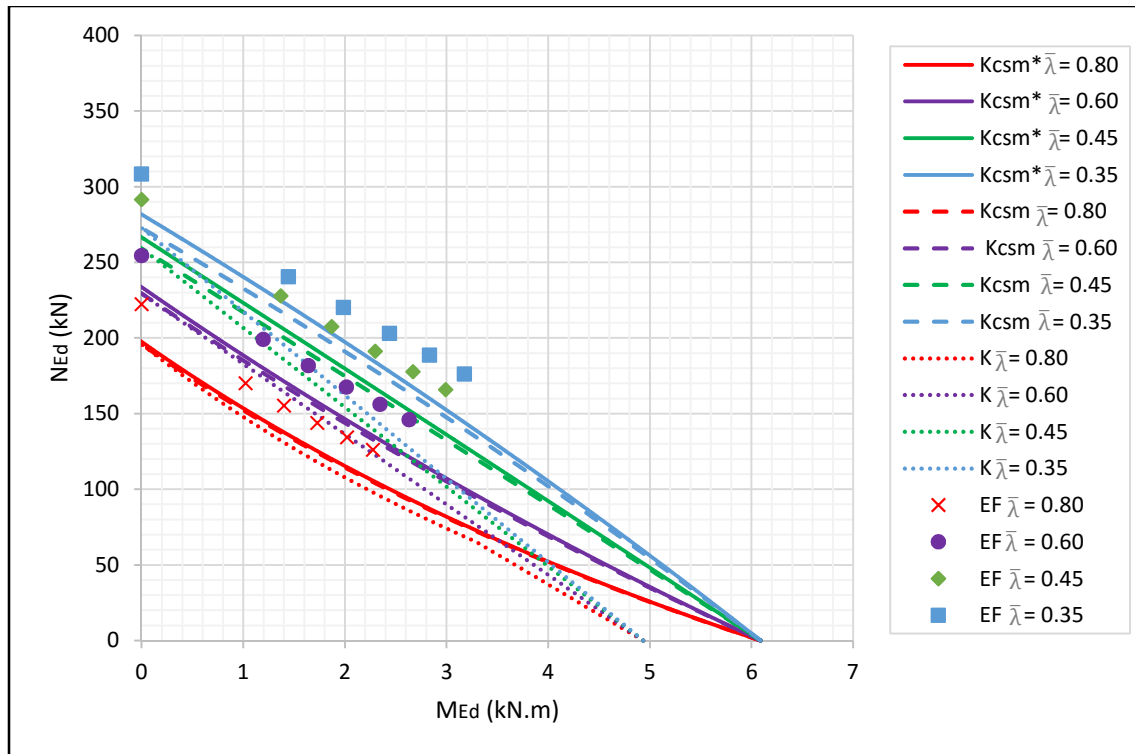


Figura 41 Curva de interacción (SHS60X60X3 ferrítico).

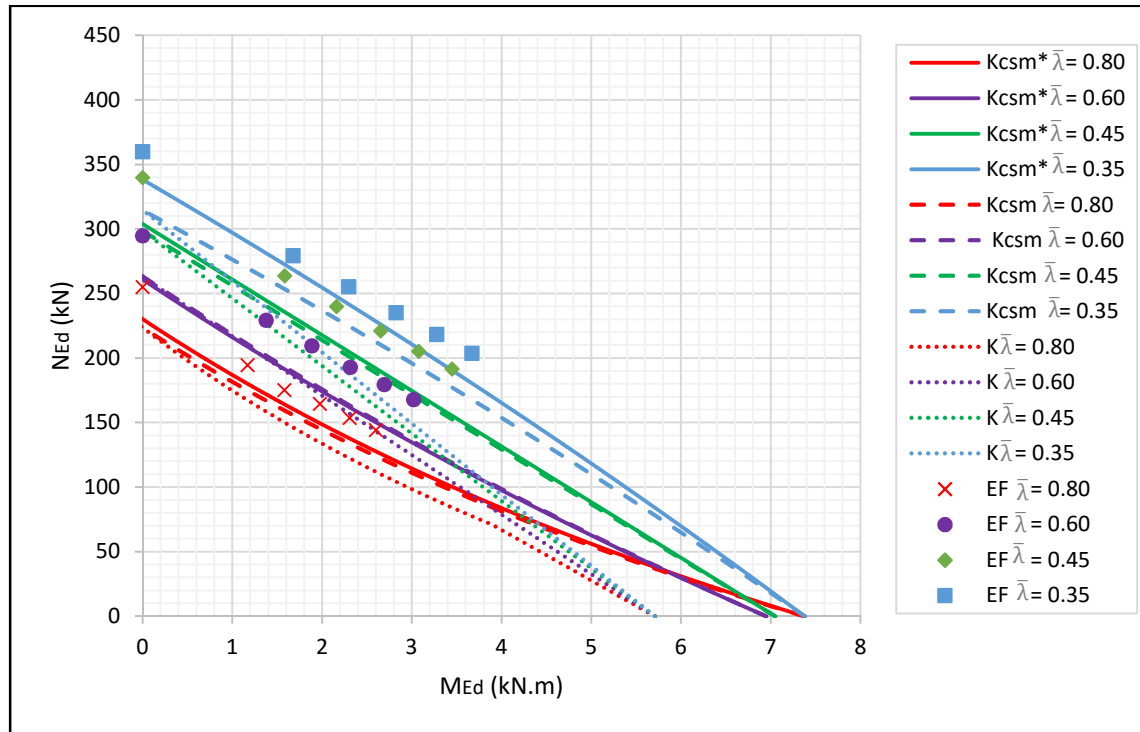


Figura 42 Curva de interacción (SHS60X60X3.5 ferrítico).

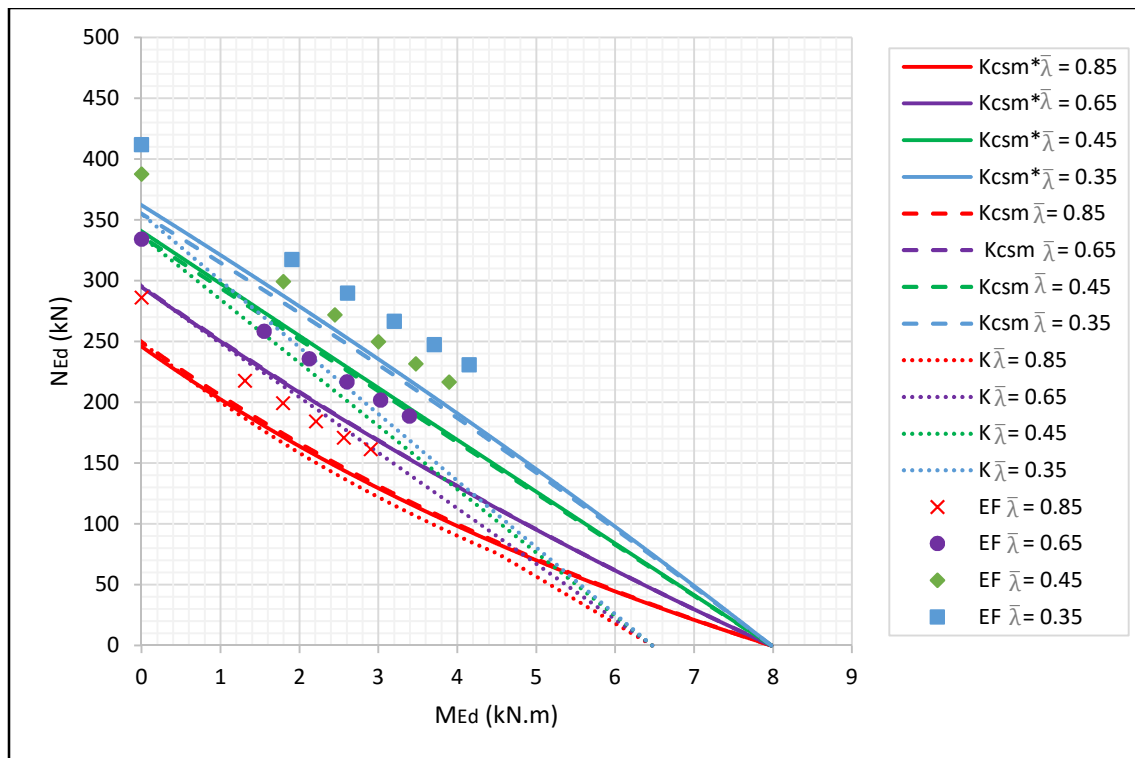


Figura 43 Curva de interacción (SHS60X60X4 ferrítico).

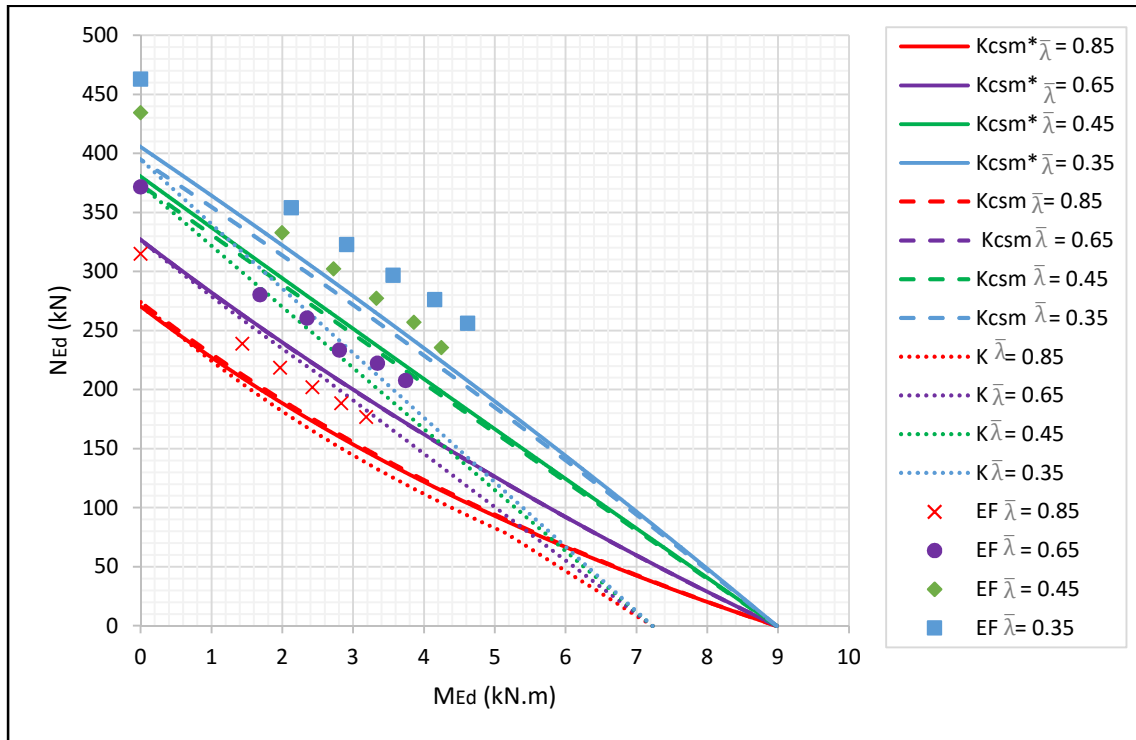


Figura 44 Curva de interacción (SHS60X60X4.5 ferrítico).

5.4 Conclusiones

Se ha realizado una presentación de los resultados obtenidos del análisis de elementos finitos, y se ha determinado las resistencias con las expresiones de diseño del pandeo por flexión establecidas en el código EN1993-1-4 [9], y por la teoría del continuous strength method (CSM). Se observó que las resistencias establecidas por el CSM se acercan más a la carga última de los elementos.

Se presentó las gráficas de las curvas de interacción de los elementos modelados, de acuerdo a las expresiones establecidas en el código EN1993-1-4 [9], y la teoría del continuous strength method (CSM). Se pudo evidenciar que las curvas de interacción del CSM reproducen el comportamiento de los elementos sometidos a carga concéntrica y excéntrica. También se pudo notar que las expresiones para la interacción establecidas por el código EN1993-1-4 [9], reproducen una curva que no se asemeja a la tendencia de los puntos correspondientes a las cargas últimas de los elementos.

La comparación de las cargas últimas de los modelos realizados en el programa Abaqus con respecto a las resistencias establecidas por el código EN1993-1-4 [9], y las propuestas con el CSM, ha permitido evidenciar un mayor grado de exactitud en la predicción de la resistencia cuando se considera la resistencia a pandeo por flexión y la resistencia a flexión con el CSM.

6 RESULTADOS DEL ESTUDIO PARAMÉTRICO Y PRESENTACIÓN DE NUEVA PROPUESTA

6.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es exponer los resultados del estudio paramétrico de una forma clara y eficiente, para poder interpretar el comportamiento real de los elementos sometidos a carga combinada de compresión más flexión, para lo cual se propone utilizar los resultados obtenidos del estudio numérico expuestos en el capítulo 4, capítulo 5 y los ensayos experimentales obtenidos de investigaciones adicionales, cuyo resumen se muestra en la sección 2.7 del capítulo 2. El número de resultados obtenidos para cada estudio es de 123 modelos para austeníticos, 109 modelos para dúplex y 103 modelos para ferríticos.

6.2 Comparación de los resultados

Los resultados experimentales y numéricos se comparan con las predicciones de capacidad del Eurocódigo y las propuestas definidas en el capítulo anterior. Los gráficos se presentan a través de las relaciones N_u/N_{Ed} , donde N_u corresponde a la carga última obtenida del análisis de elementos finitos o de ensayos experimentales y el ángulo θ que se determina con la ecuación (6.1), y se explica en la Figura 45.

$$\theta = \tan^{-1} \left[\left(\frac{N_{Ed}}{N_r} \right) / \left(\frac{M_{Ed}}{M_r} \right) \right] \quad (6.1)$$

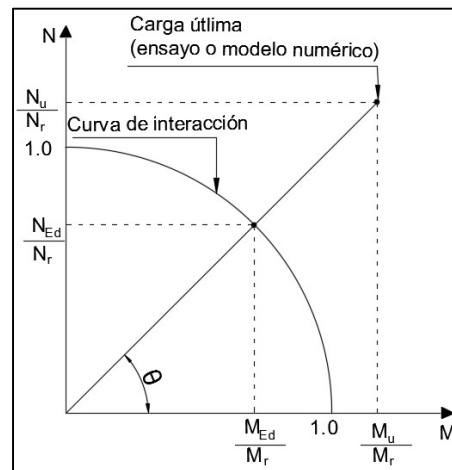


Figura 45 Definición del ángulo θ .

Los métodos se evalúan mediante comparaciones de los resultados numéricos y experimentales, cuyos resultados poseen factores de seguridad parcial igual a la unidad. La carga aplicada es compresión pura a flexocompresión, donde el ángulo theta θ igual a 0° grados representa flexión pura y 90° representa compresión pura.

6.2.1 Comparación de los resultados del acero inoxidable austenítico

Las comparaciones para el acero austenítico se presentan en términos de la relación de carga de falla N_u/N_{Ed} , y el ángulo θ , cuya explicación se muestra en la Figura 45. Las relaciones mayores que la unidad indican que los puntos de datos se encuentran en el lado seguro, es decir fuera de la curva de interacción de diseño. Los resultados se muestran de la Tabla 42 a la Tabla 47 y de la Figura 46 a la Figura 48.

Tabla 42 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X3 austenítico).

Continuous strength method (CMS) propuesta de tesis (K_{csm}^*)		Continuous strength method (CMS) propuesta O. Zhao (K_{csm})		EN1993-1-4 (K)	
θ	N_u	θ	N_u	θ	N_u
(grados)	$N_{Ed(CSM \text{ Tesis})}$	(grados)	$N_{Ed(CSM \text{ O.Zhao})}$	(grados)	$N_{Ed(EN1993-1-4)}$
90.00	1.06	90.00	1.14	90.00	1.14
73.80	1.10	74.90	1.16	73.90	1.20
66.50	1.12	67.90	1.18	66.60	1.24
59.90	1.15	61.60	1.20	60.00	1.28
54.10	1.17	56.00	1.22	54.20	1.31
49.00	1.19	51.00	1.23	49.10	1.34
90.00	1.06	90.00	1.12	90.00	1.12
74.80	1.10	74.80	1.15	74.70	1.16
67.90	1.13	67.90	1.18	67.70	1.20
61.50	1.15	61.50	1.19	61.30	1.23
55.90	1.17	55.90	1.21	55.60	1.25
50.90	1.19	50.90	1.22	50.60	1.28
90.00	1.05	90.00	1.08	90.00	1.08
77.00	1.11	77.40	1.13	76.50	1.10
70.90	1.14	71.40	1.16	70.20	1.11
65.20	1.16	65.80	1.18	64.40	1.13
60.00	1.18	60.70	1.20	59.10	1.16
55.30	1.19	56.10	1.20	54.30	1.17
90.00	1.10	90.00	1.11	90.00	1.10
79.30	1.13	79.30	1.13	78.60	1.10
74.20	1.15	74.20	1.15	73.20	1.12
69.30	1.17	69.40	1.17	68.10	1.13
64.80	1.18	64.80	1.18	63.30	1.14
60.50	1.19	60.60	1.19	58.90	1.15

Tabla 43 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X3.5 austenítico).

Continuous strength method (CMS) propuesta de tesis (K_{csm}^*)		Continuous strength method (CMS) propuesta O. Zhao (K_{csm})		EN1993-1-4 (K)	
θ (grados)	N_u $N_{Ed(CSM \text{ Tesis})}$	θ (grados)	N_u $N_{Ed(CSM \text{ O.Zhao})}$	θ (grados)	N_u $N_{Ed(EN1993-1-4)}$
90.00	1.00	90.00	1.15	90.00	1.15
74.10	1.03	76.10	1.15	74.00	1.21
66.80	1.05	69.60	1.16	66.70	1.25
60.20	1.07	63.70	1.18	60.10	1.29
54.50	1.09	58.30	1.19	54.30	1.32
49.40	1.10	53.40	1.20	49.20	1.35
90.00	1.06	90.00	1.13	90.00	1.13
75.20	1.09	76.10	1.16	74.80	1.17
68.30	1.12	69.70	1.18	67.80	1.20
62.10	1.14	63.70	1.20	61.50	1.23
56.50	1.16	58.30	1.21	55.80	1.26
51.50	1.17	53.50	1.22	50.80	1.29
90.00	1.01	90.00	1.09	90.00	1.09
77.60	1.06	78.50	1.12	76.70	1.10
71.70	1.08	73.00	1.14	70.40	1.12
66.20	1.10	67.80	1.15	64.60	1.14
61.20	1.11	63.00	1.16	59.30	1.16
56.50	1.12	58.50	1.17	54.60	1.17
90.00	1.10	90.00	1.14	90.00	1.14
80.00	1.09	80.40	1.12	78.80	1.11
75.20	1.11	75.70	1.13	73.50	1.13
70.60	1.12	71.20	1.14	68.40	1.14
66.30	1.13	67.00	1.15	63.70	1.15
62.20	1.14	63.00	1.16	59.30	1.16

Tabla 44 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X4 austenítico).

Continuous strength method (CMS) propuesta de tesis (K_{csm}^*)		Continuous strength method (CMS) propuesta O. Zhao (K_{csm})		EN1993-1-4 (K)	
θ (grados)	N_u $N_{Ed(CSM \text{ Tesis})}$	θ (grados)	N_u $N_{Ed(CSM \text{ O.Zhao})}$	θ (grados)	N_u $N_{Ed(EN1993-1-4)}$
90.00	0.98	90.00	1.17	90.00	1.17
74.10	1.00	76.70	1.15	74.00	1.22
66.90	1.02	70.50	1.16	66.80	1.26
60.40	1.04	64.70	1.18	60.20	1.30
54.60	1.06	59.40	1.18	54.40	1.33
49.60	1.07	54.70	1.18	49.30	1.35
90.00	0.98	90.00	1.15	90.00	1.15
75.40	1.01	77.40	1.14	74.90	1.18
68.60	1.03	71.50	1.16	67.90	1.21
62.40	1.05	66.00	1.16	61.60	1.24
56.90	1.06	60.80	1.17	56.00	1.26
51.90	1.08	56.20	1.18	51.00	1.29
90.00	1.00	90.00	1.11	90.00	1.11
77.90	1.04	79.00	1.12	76.80	1.11
72.20	1.06	73.80	1.13	70.60	1.13
66.90	1.07	68.80	1.14	64.90	1.14
61.90	1.08	64.20	1.15	59.60	1.16
57.30	1.09	59.90	1.15	54.90	1.17
90.00	1.08	90.00	1.13	90.00	1.13
80.50	1.08	80.90	1.12	79.00	1.12
75.90	1.09	76.50	1.12	73.80	1.13
71.50	1.10	72.20	1.13	68.80	1.14
67.30	1.11	68.20	1.14	64.10	1.16
63.30	1.11	64.30	1.15	59.80	1.17

Tabla 45 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X4.5 austenítico).

Continuous strength method (CMS) propuesta de tesis (K_{csm}^*)		Continuous strength method (CMS) propuesta O. Zhao (K_{csm})		EN1993-1-4 (K)	
θ (grados)	N_u $N_{Ed(CSM \text{ Tesis})}$	θ (grados)	N_u $N_{Ed(CSM \text{ O.Zhao})}$	θ (grados)	N_u $N_{Ed(EN1993-1-4)}$
90.00	1.00	90.00	1.19	90.00	1.19
74.20	1.02	76.60	1.17	74.10	1.23
67.00	1.04	70.40	1.17	66.90	1.26
60.50	1.06	64.60	1.18	60.30	1.30
54.80	1.08	59.30	1.19	54.50	1.34
49.70	1.08	54.50	1.20	49.50	1.35
90.00	1.00	90.00	1.16	90.00	1.16
75.50	1.03	77.40	1.15	75.00	1.18
68.80	1.05	71.40	1.17	68.10	1.21
62.70	1.07	65.90	1.17	61.80	1.24
57.10	1.08	60.80	1.18	56.10	1.26
52.20	1.09	56.10	1.19	51.20	1.29
90.00	1.03	90.00	1.11	90.00	1.11
78.20	1.06	79.10	1.13	77.00	1.12
72.60	1.08	73.90	1.14	70.90	1.13
67.30	1.09	68.90	1.15	65.20	1.15
62.40	1.10	64.20	1.16	59.90	1.16
57.90	1.11	59.90	1.16	55.20	1.17
90.00	1.11	90.00	1.14	90.00	1.14
80.70	1.10	81.00	1.12	79.20	1.13
76.30	1.11	76.60	1.13	74.10	1.13
72.00	1.12	72.40	1.14	69.20	1.15
67.80	1.13	68.40	1.15	64.60	1.16
64.00	1.13	64.60	1.15	60.30	1.17

Tabla 46 Comparación de las resistencias obtenidas de la literatura (austenítico).

Continuous strength method (CMS) propuesta de tesis (K_{csm}^*)		Continuous strength method (CMS) propuesta O. Zhao (K_{csm})		EN1993-1-4 (K)		Ref.
θ (grados)	N_u $N_{Ed(CSM T.)}$	θ (grados)	N_u $N_{Ed(CSM O.Zhao)}$	θ (grados)	N_u $N_{Ed(EN1993-1-4)}$	
90.00	1.02	90.00	0.98	90.00	0.98	L. Gardner, D. Nethercot [14]
90.00	1.14	90.00	1.10	90.00	1.10	
90.00	1.04	90.00	1.03	90.00	1.03	
90.00	1.00	90.00	1.07	90.00	1.06	
90.00	0.99	90.00	0.98	90.00	0.98	
90.00	1.10	90.00	1.06	90.00	1.06	
90.00	1.06	90.00	0.99	90.00	0.99	
90.00	1.02	90.00	1.03	90.00	1.03	
90.00	1.10	90.00	1.10	90.00	1.10	
90.00	1.04	90.00	1.03	90.00	1.03	L. Gardner, A. Talja, N. Badoo [15]
90.00	0.97	90.00	0.96	90.00	0.96	
90.00	0.98	90.00	0.97	90.00	0.97	
90.00	1.18	90.00	1.20	90.00	1.20	Y. Liu, B. Young [16]
90.00	1.17	90.00	1.18	90.00	1.18	
89.20	1.21	90.00	1.19	90.00	1.19	
89.40	1.01	90.00	0.99	90.00	0.99	
85.60	1.00	85.60	0.98	85.60	0.96	
57.80	1.08	59.00	1.11	58.80	1.37	O. Zhao, B. Rossi, L. Gardner, B. Young [17]
47.80	1.05	49.10	1.08	48.90	1.36	
73.60	0.97	74.10	0.99	74.20	1.14	
41.90	1.04	42.80	1.06	42.90	1.35	
26.60	1.16	27.40	1.17	27.40	1.51	
43.20	1.03	45.40	1.07	44.50	1.39	
33.30	1.05	35.30	1.08	34.50	1.43	
56.60	0.97	60.00	1.06	57.00	1.28	
30.30	1.08	34.00	1.13	31.00	1.47	
21.90	1.10	25.00	1.14	23.00	1.47	

Tabla 47 Media y coeficiente de variación (austenítico).

	N_u $N_{Ed(CSM Tesis)}$	N_u $N_{Ed(CSM O.Zhao)}$	N_u $N_{Ed(EN1993-1-4)}$
Media	1.08	1.14	1.18
COV	0.05	0.05	0.09

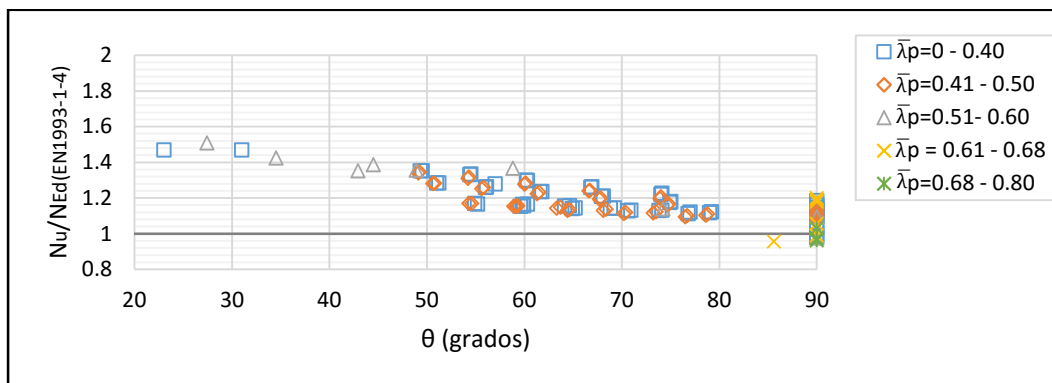


Figura 46 Comparación de los resultados con el código EN1993-1-4 (austenítico).

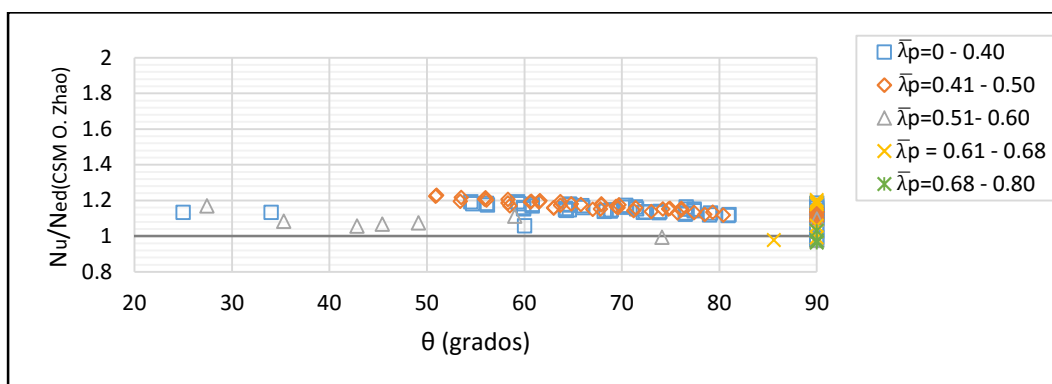


Figura 47 Comparación de los resultados con la propuesta O. Zhao (austenítico).

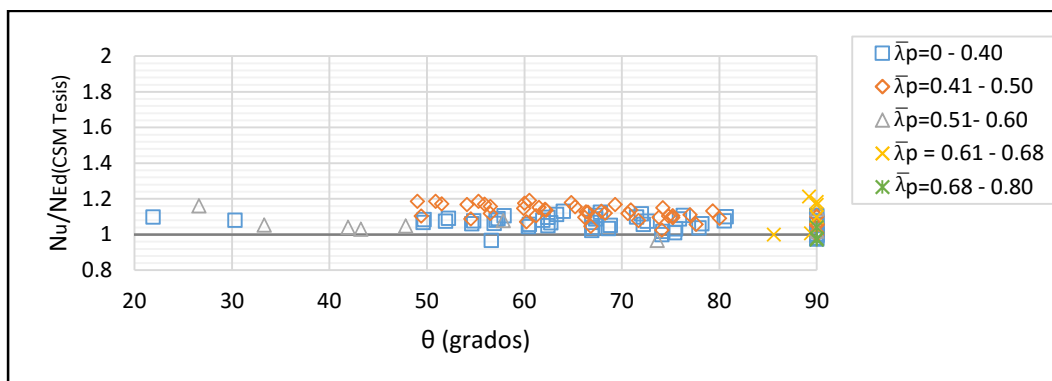


Figura 48 Comparación de los resultados con la propuesta de tesis CSM (austenítico).

6.2.2 Comparación de los resultados del acero inoxidable dúplex

Como se explicó anteriormente para el acero austenítico, las comparaciones para el acero dúplex se presentan en términos de la relación de carga de falla N_u/N_{Ed} y el ángulo θ , cuya explicación se ilustra en la Figura 45. Las relaciones mayores que la unidad indican que los puntos de datos se encuentran en el lado seguro, es decir fuera de la curva de interacción de diseño. Los resultados se muestran de la Tabla 48 a la Tabla 53 y de la Figura 49 a la Figura 51.

Tabla 48 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X3 dúplex).

Continuous strength method (CMS) propuesta de tesis (K_{csm}^*)		Continuous strength method (CMS) propuesta O. Zhao (K_{csm})		EN1993-1-4 (K)	
θ (grados)	N_u $N_{Ed(CSM \text{ Tesis})}$	θ (grad.)	N_u $N_{Ed(CSM \text{ O.Zhao})}$	θ (grad.)	N_u $N_{Ed(EN1993-1-4)}$
90.00	1.09	90.00	1.14	90.00	1.14
74.00	1.09	74.60	1.13	74.40	1.18
66.70	1.11	67.60	1.15	67.30	1.21
60.10	1.13	61.20	1.16	60.80	1.24
54.30	1.15	55.50	1.18	55.10	1.27
49.30	1.16	50.50	1.19	50.10	1.29
90.00	1.09	90.00	1.13	90.00	1.13
75.10	1.10	75.60	1.13	75.40	1.15
68.20	1.12	68.90	1.15	68.60	1.17
61.90	1.13	62.80	1.16	62.40	1.20
56.30	1.15	57.30	1.17	56.90	1.22
51.30	1.16	52.40	1.18	52.00	1.24
90.00	1.10	90.00	1.12	90.00	1.12
78.20	1.10	78.70	1.12	77.80	1.12
72.60	1.11	73.40	1.13	72.00	1.13
67.30	1.13	68.30	1.15	66.60	1.15
62.40	1.14	63.50	1.16	61.50	1.16
57.90	1.15	59.20	1.17	57.00	1.17
90.00	1.15	90.00	1.16	90.00	1.16
80.10	1.12	80.20	1.13	80.10	1.14
75.40	1.12	75.50	1.14	75.30	1.15
70.80	1.14	71.00	1.15	70.70	1.16
66.50	1.14	66.70	1.15	66.40	1.17
62.40	1.15	62.70	1.16	62.30	1.18

Tabla 49 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X3.5 dúplex).

Continuous strength method (CMS) propuesta de tesis (K_{csm}^*)		Continuous strength method (CMS) propuesta O. Zhao (K_{csm})		EN1993-1-4 (K)	
θ (grados)	N_u $N_{Ed(CSM \text{ Tesis})}$	θ (grados)	N_u $N_{Ed(CSM \text{ O.Zhao})}$	θ (grados)	N_u $N_{Ed(EN1993-1-4)}$
90.00	1.05	90.00	1.16	90.00	1.16
74.40	1.05	75.70	1.13	74.50	1.19
67.20	1.06	69.10	1.13	67.40	1.22
60.80	1.08	63.00	1.14	60.90	1.25
55.00	1.09	57.50	1.15	55.20	1.27
50.00	1.10	52.60	1.16	50.20	1.30
90.00	1.05	90.00	1.14	90.00	1.14
75.60	1.05	76.60	1.12	75.50	1.15
68.90	1.07	70.40	1.13	68.80	1.17
62.80	1.08	64.60	1.14	62.60	1.20
57.20	1.09	59.30	1.15	57.10	1.22
52.30	1.10	54.50	1.15	52.10	1.24
90.00	1.08	90.00	1.13	90.00	1.13
78.20	1.07	78.70	1.11	77.80	1.12
72.60	1.08	73.40	1.12	72.00	1.14
67.30	1.09	68.30	1.12	66.60	1.15
62.40	1.10	63.50	1.13	61.50	1.16
57.90	1.10	59.20	1.14	57.00	1.17
90.00	1.14	90.00	1.17	90.00	1.17
80.80	1.10	81.00	1.12	80.30	1.14
76.40	1.10	76.70	1.12	75.60	1.15
72.10	1.11	72.50	1.12	71.10	1.17
68.00	1.11	68.50	1.13	66.80	1.18
64.20	1.12	64.70	1.13	62.80	1.18

Tabla 50 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X4 dúplex).

Continuous strength method (CMS) propuesta de tesis (K_{csm}^*)		Continuous strength method (CMS) propuesta O. Zhao (K_{csm})		EN1993-1-4 (K)	
θ (grados)	N_u $N_{Ed(CSM \text{ Tesis})}$	θ (grad.)	N_u $N_{Ed(CSM \text{ O.Zhao})}$	θ (grad.)	N_u $N_{Ed(EN1993-1-4)}$
90.00	1.07	90.00	1.17	90.00	1.17
74.40	1.06	75.70	1.14	74.50	1.19
67.30	1.08	69.00	1.15	67.50	1.23
60.90	1.09	62.90	1.15	61.10	1.25
55.20	1.10	57.40	1.16	55.30	1.28
50.10	1.11	52.50	1.17	50.30	1.30
90.00	1.08	90.00	1.15	90.00	1.15
75.70	1.07	76.60	1.13	75.60	1.15
69.10	1.08	70.30	1.14	68.90	1.18
63.00	1.10	64.50	1.15	62.80	1.20
57.50	1.11	59.20	1.15	57.20	1.22
52.60	1.12	54.50	1.16	52.30	1.24
90.00	1.11	90.00	1.14	90.00	1.14
78.40	1.09	78.80	1.11	77.90	1.13
73.00	1.09	73.50	1.12	72.20	1.14
67.80	1.10	68.40	1.13	66.80	1.16
62.90	1.11	63.70	1.13	61.90	1.16
58.50	1.12	59.30	1.14	57.30	1.17
90.00	1.17	90.00	1.18	90.00	1.18
81.10	1.11	81.20	1.12	80.50	1.15
76.80	1.12	76.90	1.12	75.80	1.16
72.60	1.12	72.70	1.13	71.40	1.17
68.70	1.13	68.70	1.13	67.20	1.18
64.90	1.13	65.00	1.14	63.20	1.19

Tabla 51 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X4.5 dúplex).

Continuous strength method (CMS) propuesta de tesis (K_{csm}^*)		Continuous strength method (CMS) propuesta O. Zhao (K_{csm})		EN1993-1-4 (K)	
θ (grados)	N_u	θ (grad.)	N_u	θ (grad.)	N_u
	$N_{Ed(CSM \text{ Tesis})}$		$N_{Ed(CSM \text{ O.Zhao})}$		$N_{Ed(EN1993-1-4)}$
90.00	1.09	90.00	1.18	90.00	1.18
74.50	1.08	75.60	1.14	74.60	1.20
67.40	1.09	68.90	1.15	67.60	1.22
61.00	1.10	62.80	1.16	61.20	1.25
55.30	1.11	57.30	1.16	55.50	1.27
50.20	1.12	52.40	1.17	50.50	1.30
90.00	1.10	90.00	1.16	90.00	1.16
75.80	1.09	76.60	1.14	75.70	1.16
69.30	1.10	70.30	1.14	69.00	1.18
63.20	1.11	64.50	1.15	63.00	1.20
57.70	1.12	59.20	1.16	57.50	1.21
52.90	1.13	54.40	1.16	52.60	1.23
90.00	1.08	90.00	1.10	90.00	1.10
78.10	1.06	78.40	1.08	77.60	1.09
72.50	1.06	72.90	1.08	71.80	1.10
67.20	1.07	67.70	1.09	66.30	1.11
62.30	1.08	62.90	1.10	61.20	1.12
57.80	1.09	58.40	1.10	56.60	1.13
90.00	1.19	90.00	1.18	90.00	1.18
81.40	1.13	81.30	1.12	80.70	1.15
77.20	1.13	77.00	1.12	76.10	1.16
73.10	1.14	72.90	1.13	71.80	1.17
69.20	1.14	69.00	1.13	67.70	1.18
65.50	1.14	65.30	1.14	63.70	1.18

Tabla 52 Comparación de las resistencias obtenidas de la literatura (dúplex).

Continuous strength method (CMS) propuesta de tesis (K_{csm^*})		Continuous strength method (CMS) propuesta O. Zhao (K_{csm})		EN1993-1-4 (K)		Ref.
θ (grad.)	N_u	θ (grad.)	N_u	θ (grad.)	N_u	
	$N_{Ed(CSM \text{ Tesis})}$		$N_{Ed(CSM \text{ O.Zhao})}$		$N_{Ed(EN1993-1-4)}$	
90.00	1.09	90.00	1.08	90.00	1.08	W. Lui [18]
90.00	1.03	90.00	1.01	90.00	1.01	
90.00	1.13	90.00	1.15	90.00	1.15	
90.00	1.09	90.00	1.09	90.00	1.09	W. Liu, B. Young [19]
90.00	1.04	90.00	1.04	90.00	1.04	
90.00	1.11	90.00	1.11	90.00	1.11	
90.00	1.03	90.00	1.03	90.00	1.03	
90.00	1.01	90.00	1.01	90.00	1.01	
89.90	1.25	89.90	1.26	89.90	1.26	Y. Huang, B. Young [20]
82.80	1.15	82.80	1.15	82.80	1.15	
75.10	1.18	75.20	1.18	75.20	1.17	
60.40	1.19	60.50	1.19	60.50	1.20	
40.00	1.20	40.10	1.21	40.10	1.25	

Tabla 53 Media y coeficiente de variación (dúplex).

	N_u	N_u	N_u
	$N_{Ed(CSM \text{ Tesis})}$	$N_{Ed(CSM \text{ O.Zhao})}$	$N_{Ed(EN1993-1-4)}$
Media	1.11	1.14	1.17
COV	0.03	0.03	0.05

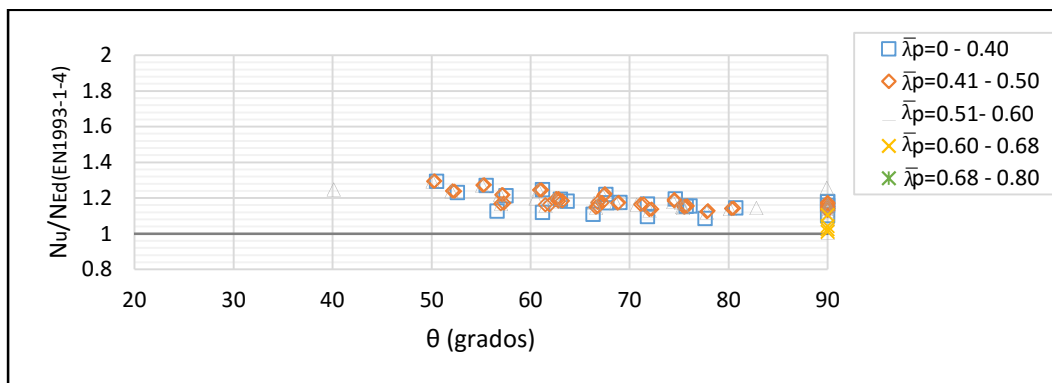


Figura 49 Comparación de los resultados con el código EN1993-1-4 (dúplex).

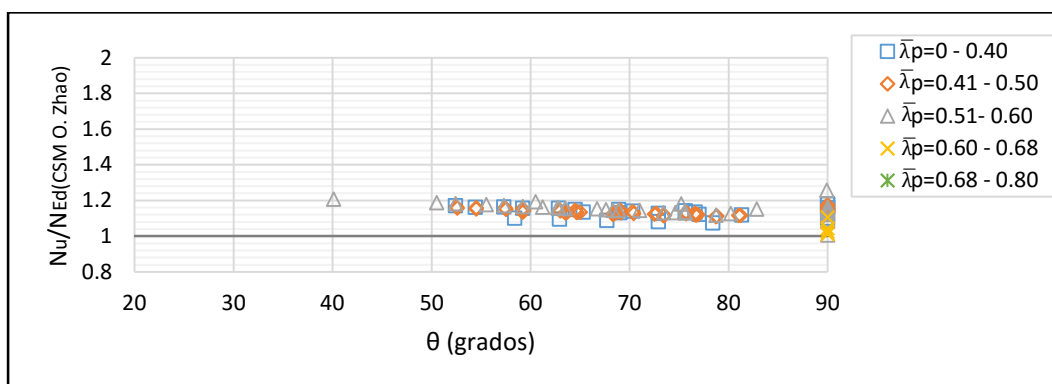


Figura 50 Comparación de los resultados con la propuesta O. CSM (dúplex).

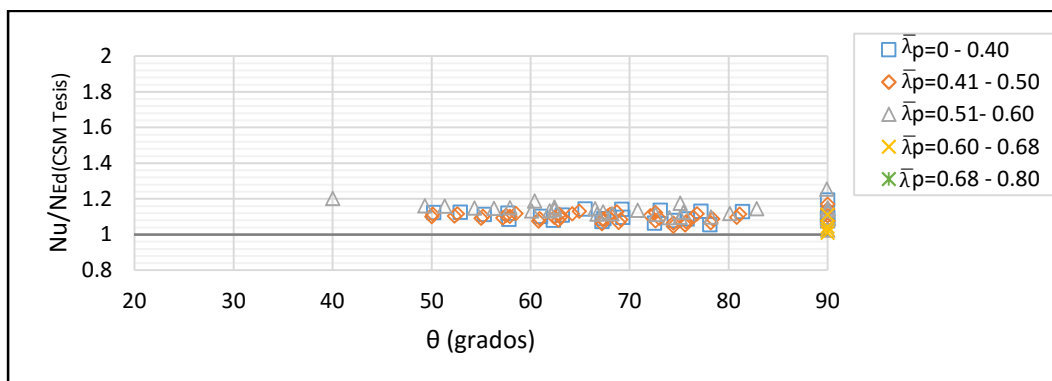


Figura 51 Comparación de los resultados con la propuesta de tesis CSM (dúplex).

6.2.3 Comparación de los resultados del acero inoxidable ferríticos

De igual manera que el acero austenítico y dúplex, las comparaciones para el acero ferrítico se presentan en términos de la relación de carga de falla N_u/N_{Ed} y el ángulo θ , cuya explicación se ilustra en la Figura 45. Las relaciones mayores que la unidad indican que los puntos de datos se encuentran en el lado seguro, es decir fuera de la curva de interacción de diseño. Los resultados se muestran de la Tabla 54 a la Tabla 59 y de la Figura 52 a la Figura 54.

Tabla 54 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X 3 ferrítico).

Continuous strength method (CMS) propuesta de tesis (K_{csm}^*)		Continuous strength method (CMS) propuesta O. Zhao (K_{csm})		EN1993-1-4 (K)	
θ (grados)	N_u $N_{Ed(CSM \text{ Tesis})}$	θ (grados)	N_u $N_{Ed(CSM \text{ O.Zhao})}$	θ (grados)	N_u $N_{Ed(EN1993-1-4)}$
90.00	1.10	90.00	1.13	90.00	1.13
74.50	1.07	75.00	1.10	74.50	1.18
67.40	1.08	68.00	1.11	67.50	1.21
61.00	1.09	61.70	1.11	61.10	1.24
55.20	1.10	56.10	1.12	55.30	1.27
50.20	1.11	51.10	1.13	50.30	1.29
90.00	1.10	90.00	1.13	90.00	1.13
75.30	1.08	75.30	1.10	75.30	1.16
68.50	1.08	68.50	1.11	68.50	1.18
62.30	1.09	62.30	1.11	62.30	1.20
56.70	1.10	56.70	1.12	56.70	1.23
51.80	1.11	51.80	1.13	51.80	1.25
90.00	1.09	90.00	1.11	90.00	1.11
77.00	1.08	77.30	1.10	76.90	1.11
70.90	1.09	71.30	1.10	70.80	1.13
65.30	1.10	65.70	1.11	65.10	1.14
60.10	1.10	60.50	1.12	59.80	1.16
55.40	1.11	55.90	1.12	55.10	1.17
90.00	1.13	90.00	1.14	90.00	1.14
79.00	1.09	79.10	1.10	78.80	1.12
73.70	1.09	73.90	1.10	73.40	1.13
68.70	1.10	68.90	1.11	68.30	1.14
64.10	1.11	64.20	1.11	63.60	1.15
59.70	1.11	59.90	1.12	59.20	1.16

Tabla 55 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X 3.5 ferrítico).

Continuous strength method (CMS) propuesta de tesis (K_{csm}^*)		Continuous strength method (CMS) propuesta O. Zhao (K_{csm})		EN1993-1-4 (K)	
θ (grados)	N_u	θ (grados)	N_u	θ (grados)	N_u
	$N_{Ed(CSM \text{ Tesis})}$		$N_{Ed(CSM \text{ O.Zhao})}$		$N_{Ed(EN1993-1-4)}$
90.00	1.07	90.00	1.15	90.00	1.15
74.60	1.03	75.60	1.10	74.60	1.18
67.60	1.04	69.00	1.10	67.50	1.22
61.20	1.05	62.90	1.10	61.10	1.24
55.50	1.06	57.40	1.11	55.40	1.27
50.50	1.07	52.50	1.11	50.40	1.29
90.00	1.12	90.00	1.14	90.00	1.14
75.50	1.09	75.70	1.11	75.30	1.16
68.80	1.10	69.10	1.11	68.60	1.18
62.60	1.10	63.10	1.12	62.40	1.21
57.10	1.11	57.60	1.12	56.80	1.23
52.20	1.12	52.70	1.13	51.90	1.25
90.00	1.13	90.00	1.12	90.00	1.12
77.30	1.12	77.20	1.11	77.00	1.11
71.30	1.12	71.20	1.11	70.90	1.13
65.70	1.13	65.60	1.12	65.20	1.14
60.60	1.13	60.40	1.13	60.00	1.16
56.00	1.14	55.70	1.13	55.30	1.17
90.00	1.11	90.00	1.14	90.00	1.14
79.40	1.07	79.70	1.09	78.90	1.13
74.30	1.05	74.70	1.07	73.60	1.12
69.50	1.07	70.00	1.09	68.60	1.14
64.90	1.08	65.60	1.09	63.90	1.15
60.70	1.08	61.40	1.10	59.60	1.16

Tabla 56 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X4 ferrítico).

Continuous strength method (CMS) propuesta de tesis (K_{csm}^*)		Continuous strength method (CMS) propuesta O. Zhao (K_{csm})		EN1993-1-4 (K)	
θ (grados)	N_u	θ (grados)	N_u	θ (grados)	N_u
	$N_{Ed(CSM\ Tesis)}$		$N_{Ed(CSM\ O.Zhao)}$		$N_{Ed(EN1993-1-4)}$
90.00	1.14	90.00	1.16	90.00	1.16
74.80	1.09	75.10	1.11	74.70	1.19
67.80	1.10	68.20	1.12	67.60	1.22
61.40	1.11	61.90	1.12	61.20	1.25
55.80	1.12	56.30	1.13	55.50	1.27
50.80	1.13	51.30	1.14	50.50	1.29
90.00	1.14	90.00	1.15	90.00	1.15
75.60	1.11	75.80	1.12	75.40	1.17
69.00	1.11	69.20	1.12	68.70	1.19
62.90	1.11	63.20	1.12	62.50	1.21
57.40	1.12	57.70	1.13	57.00	1.23
52.50	1.13	52.80	1.13	52.00	1.25
90.00	1.13	90.00	1.13	90.00	1.13
77.50	1.11	77.50	1.11	77.10	1.12
71.60	1.11	71.60	1.11	71.10	1.13
66.10	1.12	66.00	1.11	65.50	1.14
61.00	1.12	61.00	1.12	60.30	1.15
56.40	1.13	56.30	1.12	55.60	1.16
90.00	1.17	90.00	1.15	90.00	1.15
79.50	1.12	79.40	1.10	79.10	1.13
74.50	1.12	74.30	1.10	73.90	1.14
69.70	1.12	69.40	1.11	68.90	1.14
65.20	1.12	64.90	1.10	64.30	1.15
61.00	1.13	60.60	1.12	59.90	1.16

Tabla 57 Comparación de las resistencias de los métodos de cálculo (SHS 60X60X 4.5 ferrítico).

Continuous strength method (CMS) propuesta de tesis (K_{csm}^*)		Continuous strength method (CMS) propuesta O. Zhao (K_{csm})		EN1993-1-4 (K)	
θ (grados)	N_u	θ (grad.)	N_u	θ (grad.)	N_u
	$N_{Ed(CSM\ Tesis)}$		$N_{Ed(CSM\ O.Zhao)}$		$N_{Ed(EN1993-1-4)}$
90.00	1.14	90.00	1.17	90.00	1.17
74.80	1.09	75.20	1.12	74.70	1.19
67.90	1.10	68.40	1.12	67.70	1.22
61.50	1.11	62.20	1.12	61.30	1.25
55.90	1.12	56.60	1.13	55.70	1.27
50.90	1.12	51.60	1.14	50.70	1.29
90.00	1.14	90.00	1.16	90.00	1.16
75.70	1.10	76.00	1.12	75.50	1.17
69.10	1.10	69.50	1.12	68.80	1.19
63.00	1.11	63.50	1.12	62.70	1.20
57.60	1.11	58.00	1.12	57.10	1.22
52.70	1.10	53.20	1.11	52.20	1.22
90.00	1.14	90.00	1.14	90.00	1.14
77.70	1.09	77.70	1.09	77.30	1.10
71.90	1.11	71.90	1.11	71.30	1.13
66.40	1.08	66.40	1.08	65.70	1.10
61.40	1.11	61.40	1.11	60.50	1.15
56.80	1.12	56.80	1.12	55.90	1.15
90.00	1.17	90.00	1.15	90.00	1.15
79.80	1.11	79.60	1.10	79.30	1.13
74.80	1.11	74.60	1.10	74.10	1.14
70.10	1.11	69.90	1.10	69.20	1.14
65.70	1.12	65.40	1.11	64.60	1.15
61.50	1.12	61.20	1.11	60.40	1.16

Tabla 58 Comparación de las resistencias obtenidas de la literatura (ferrítico).

Continuous strength method (CMS) propuesta de tesis (K_{csm}^*)		Continuous strength method (CMS) propuesta O. Zhao (K_{csm})		EN1993-1-4 (K)		Ref.
θ (grad.)	N_u	θ (grad.)	N_u	θ (grad.)	N_u	
	$N_{Ed(CSM \text{ Tesis})}$		$N_{Ed(CSM \text{ O.Zhao})}$		$N_{Ed(EN1993-1-4)}$	
90.00	1.14	90.00	1.13	90.00	1.13	I. Arrayago, E. Real, E. Mirambell, L. Gardner [11]
64.40	1.07	64.20	1.06	64.40	1.09	
46.20	1.08	46.00	1.08	46.20	1.11	
90.00	1.06	90.00	1.04	90.00	1.04	
53.10	1.00	53.10	0.99	52.80	1.03	
90.00	1.06	90.00	1.02	90.00	1.02	
67.70	1.09	67.00	1.06	66.30	1.15	

Tabla 59 Media y coeficiente de variación (ferrítico).

	N_u	N_u	N_u
	$N_{Ed(CSM \text{ Tesis})}$	$N_{Ed(CSM \text{ O.Zhao})}$	$N_{Ed(EN1993-1-4)}$
Media	1.10	1.11	1.17
COV	0.02	0.02	0.05

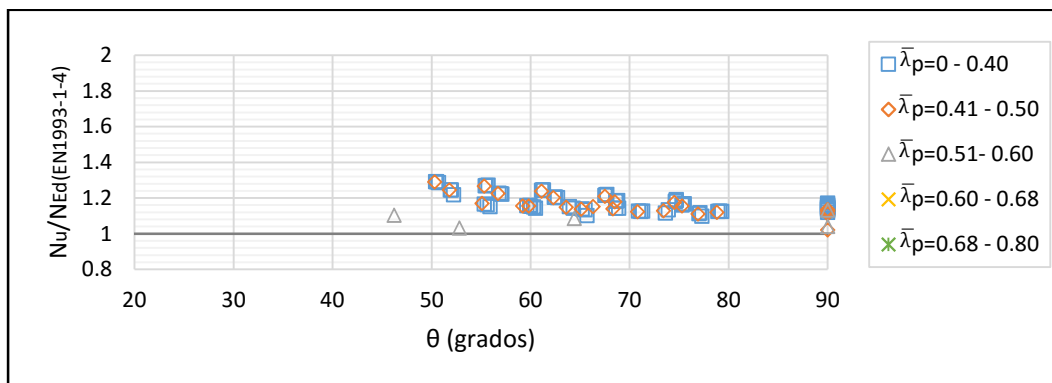


Figura 52 Comparación de los resultados con el código EN1993-1-4 (ferríticos).

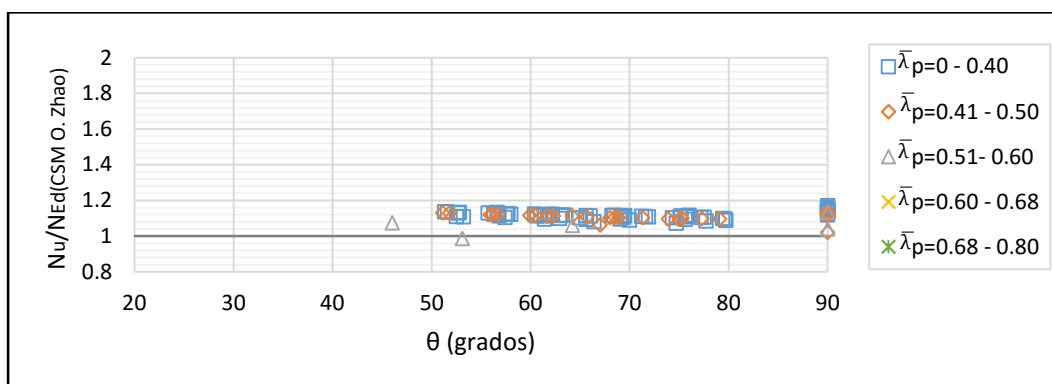


Figura 53 Comparación de los resultados con la propuesta O. Zhao (ferríticos).

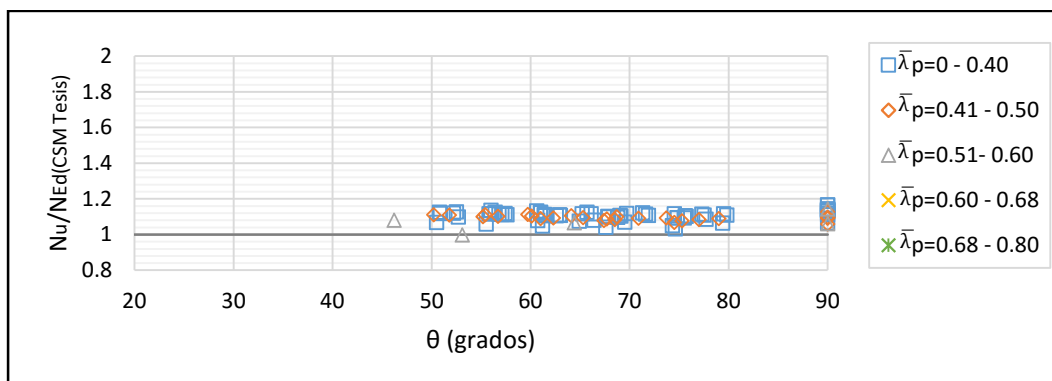


Figura 54 Comparación de los resultados con la propuesta de tesis CSM (ferríticos).

6.3 Presentación de nueva propuesta

La propuesta de O. Zhao y la propuesta de tesis son procedimientos confiables, para determinar la resistencia a carga combinada. Como podemos observar de la Figura 46 a la Figura 54. Las propuestas proporcionan una capacidad de resistencia al pandeo por flexión más real con respecto a las predicciones de resistencia del código EN1993-1-4 [9]. Además, las propuestas proporcionan relaciones de resistencia más uniformes con respecto a las relaciones con la resistencia establecida en el código EN1993-1-4 [9]. Una de las razones por las cuales el continuous strength method (CSM) permite predecir valores más reales o menos conservadores, es porque la resistencia al pandeo por flexión $N_{b,CSM}$ está mejor predicha frente a la resistencia proporcionada por el código EN1993-1-4 [9].

Las comparaciones entre las relaciones de cargas últimas con las resistencias proporcionadas por los métodos establecidos, permite proponer una nueva propuesta con factores de interacción unificados, es decir un valor único y general para los tres tipos de aceros inoxidables.

El factor de interacción K_{CSM} corresponde a la propuesta realizada por O. Zhao y se determina con la ecuación (2.19a), donde se utilizan los coeficientes D_1 , D_2 y D_3 que se definen en la Tabla 2. Al igual que la propuesta realizada por O. Zhao, la propuesta de tesis también utiliza la misma ecuación del factor de interacción, con la diferencia del uso de la resistencia al pandeo por flexión de acuerdo al CSM, y se utilizan los mismos coeficientes para el factor de interacción.

En este apartado se calibran los coeficientes de interacción con la utilización de las curvas de interacción de las propuestas establecidas.

Para obtener una propuesta capaz de predecir la interacción de una carga combinada de resistencia a flexión, se debe determinar nuevos coeficientes, los cuales deben considerar el comportamiento de los aceros inoxidables austenítico, dúplex y ferrítico. Los coeficientes de interacción han sido definidos mediante un estudio, donde se valora el comportamiento real de las secciones y el grado de seguridad requerido. El análisis de seguridad requerido se presenta a través de un estudio de validación estadística, el cual se muestra en la sección 6.4.

Se presentan los coeficientes para determinar el factor de interacción de la nueva propuesta en la Tabla 60:

Tabla 60 Nueva propuesta de coeficientes para diferentes acero inoxidables.

Tipo de acero	D_1^*	D_2^*	D_3^*
Austeníticos			
Dúplex	1.9	0.31	1.3
Ferríticos			

Reemplazando los coeficientes de la Tabla 60 en la ecuación (2.44), obtenemos una nueva ecuación para determinar el coeficiente de interacción, la cual llamaremos K_{csm*1} , ecuación (6.2).

$$K_{csm*1} = 1 + (1.9\bar{\lambda} - 0.589) \frac{N_{Ed}}{N_{b,csm}} \leq 1 + 1.881 \frac{N_{Ed}}{N_{b,csm}} \quad (6.2)$$

Se realiza un análisis de los factores de interacción numéricamente derivados, se presenta una comparación de los modelos numéricos, considerando el factor de interacción y la esbeltez del elemento para cada carga de compresión axial, la cual se mide a través de la relación $n = N_u / N_{b,csm}$. En la Figura 55 a la Figura 57 se presenta un análisis del comportamiento del factor de interacción de las propuestas de tesis, comparado con el factor de interacción real, es decir, el obtenido de los modelos en el análisis de elementos finitos.

En la gráfica se presenta un análisis del coeficiente de interacción mediante la siguiente simbología: “num*” representa el comportamiento del factor de interacción de la nueva propuesta con los coeficientes de interacción unificados, “num” representa el comportamiento de la propuesta de tesis considerando el pandeo por flexión y la resistencia a flexión con el CSM, y “EF” representa el comportamiento real obtenido de un análisis de elementos finitos. El factor de interacción que corresponde a los modelos de elementos finitos, se determina con la ecuación (6.3), el factor de interacción que corresponde a los modelos numéricos con la propuesta de tesis se determina con la ecuación (2.44), y el factor de interacción que corresponde a la nueva propuesta se determina con la ecuación (6.2). La ecuación (6.3) representa a la ecuación (2.42).

$$K_{csm*} = \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{b,csm}}\right) \left(\frac{N_{Ed}}{M_{csm,Rd}}\right) \quad (6.3)$$

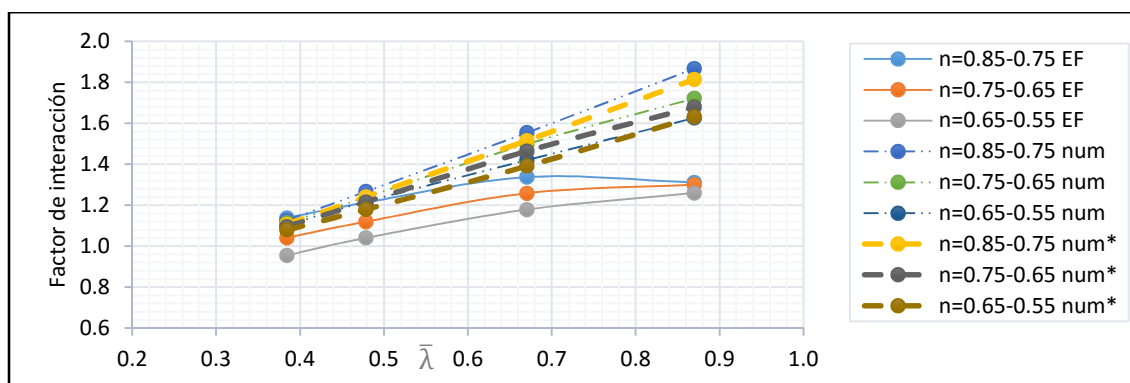


Figura 55 Comparación del factor de interacción de las propuestas y EF (SHS 60X60X4 – austenítico).

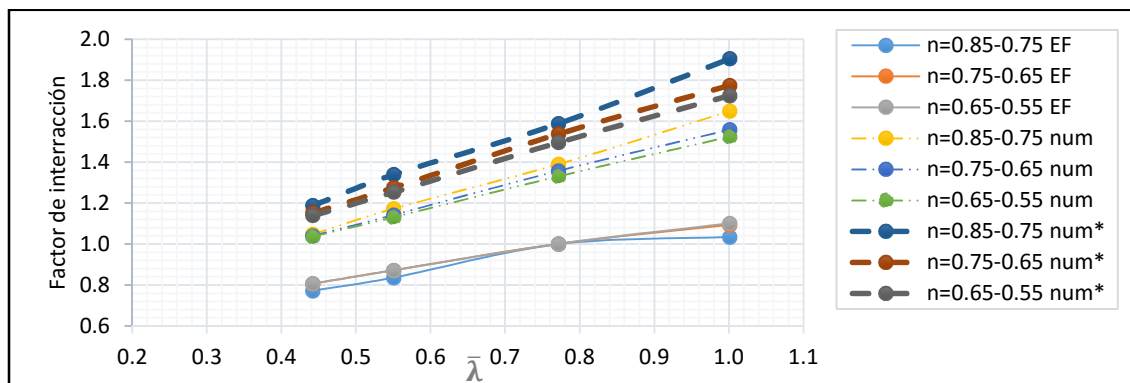


Figura 56 Comparación del factor de interacción de las propuestas y EF (SHS 60X60X4 – dúplex).

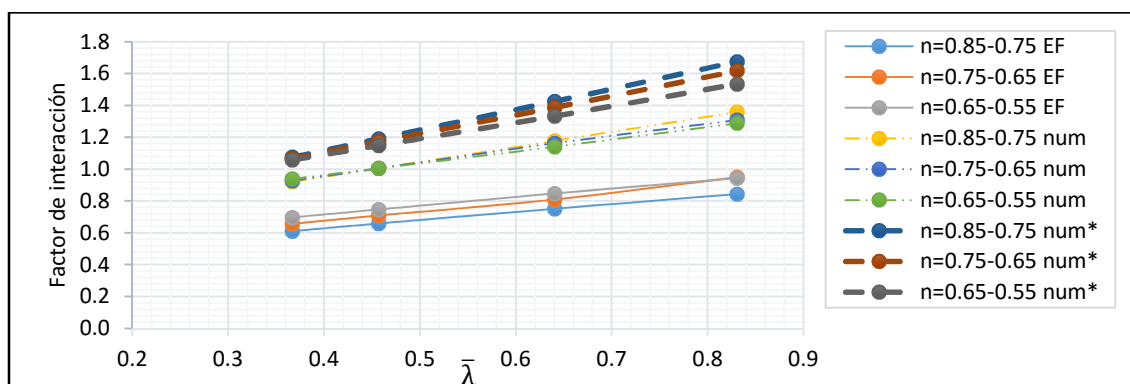


Figura 57 Comparación del factor de interacción de las propuestas y EF (SHS 60X60X4 – ferrítico).

De la Figura 55 a la Figura 57, se puede valorar la eficiencia de las propuestas de tesis con respecto al comportamiento real de los elementos, donde se observa que las expresiones de cálculo para el factor de interacción permiten replicar el mismo comportamiento que posee un elemento real, pero cada expresión ofrece un grado de exactitud diferente, esto se puede interpretar debido a que las líneas correspondientes a las propuestas poseen la misma pendiente que los modelos reales, pero con una diferencia en los factores de interacción.

La pendiente de la Figura 55 a la Figura 57 depende de la esbeltez del elemento. Las expresiones para el cálculo del factor de interacción replican el comportamiento real para elementos con esbelteces bajas, es decir para elementos robustos.

Se presentan las curvas de interacción de la propuesta con el nuevo factor de interacción, los resultados se muestran de la Figura 58 a la Figura 69. Se verifica que los puntos correspondientes a las cargas y momentos últimos se encuentran sobre las curvas de interacción, donde K_{csm*1} representa la curva con la nueva propuesta del factor de interacción, y EF son los puntos correspondientes a las cargas últimas N_u y los momentos últimos M_u .

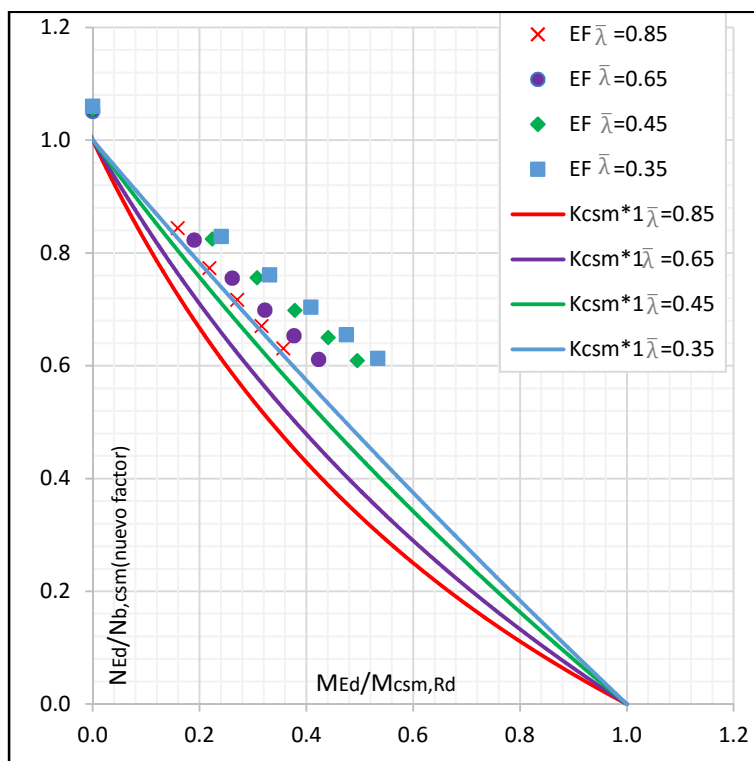


Figura 58 Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X3 – austenítico).

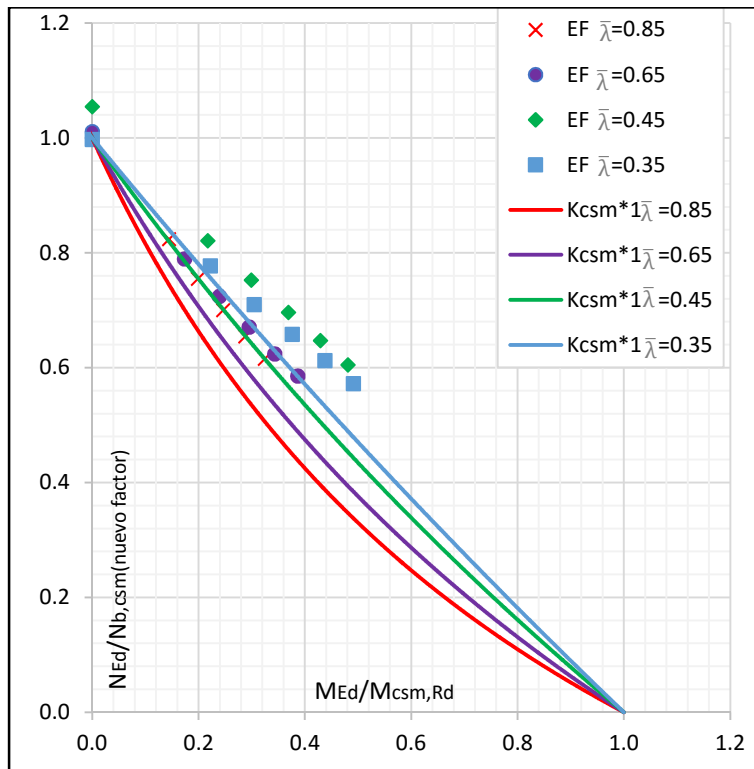


Figura 59 Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X3.5 – austenítico).

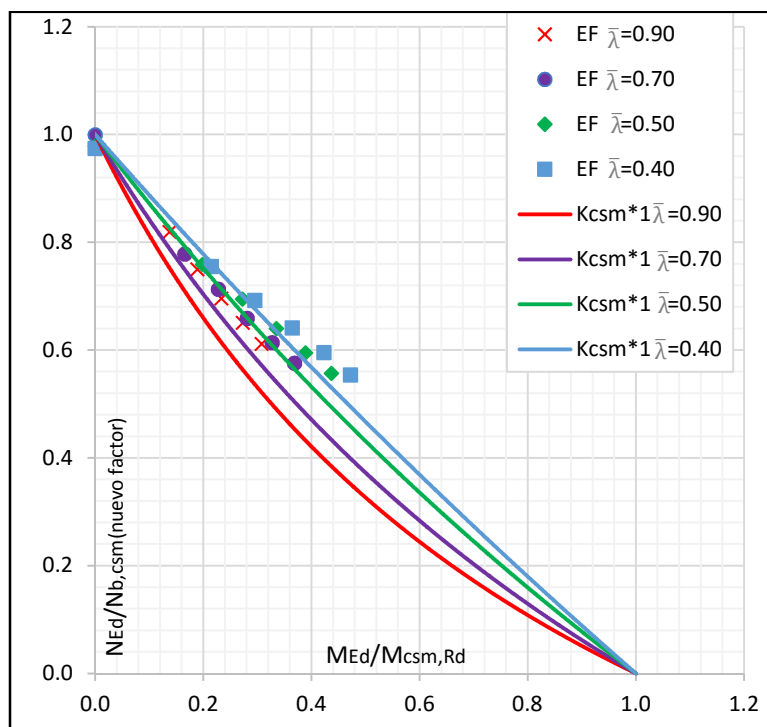


Figura 60 Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X4 – austenítico).

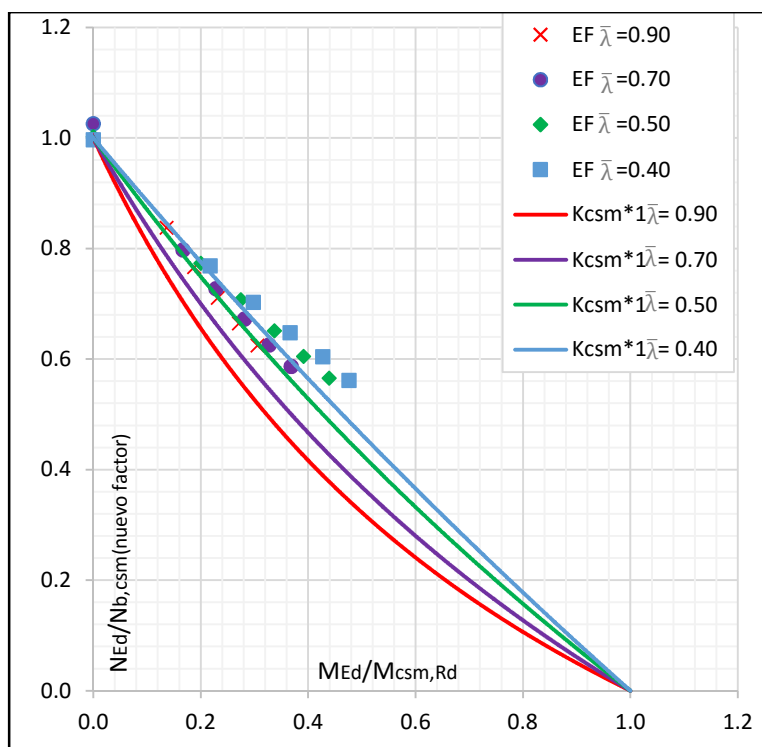


Figura 61 Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X4.5 – austenítico).

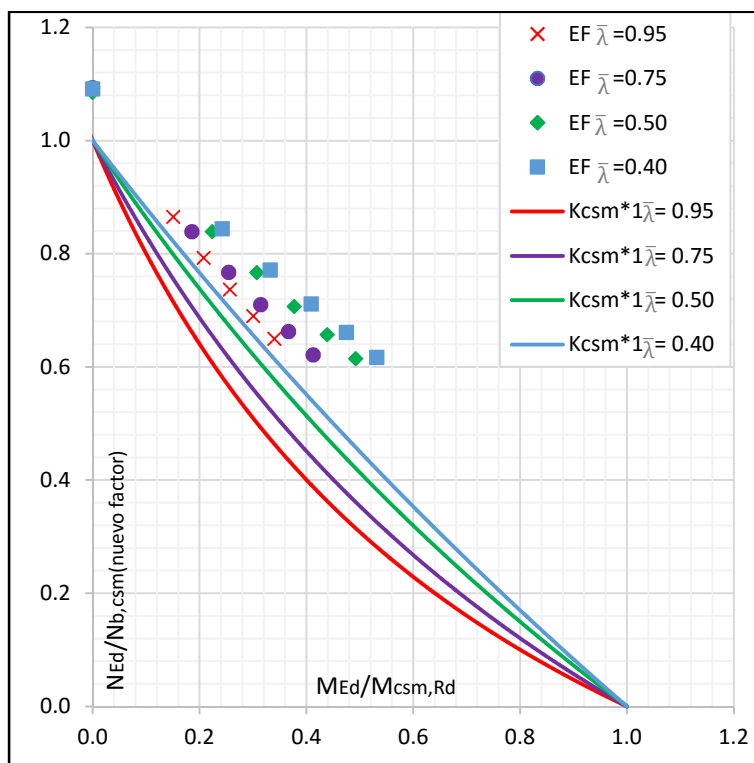


Figura 62 Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X3 – dúplex).

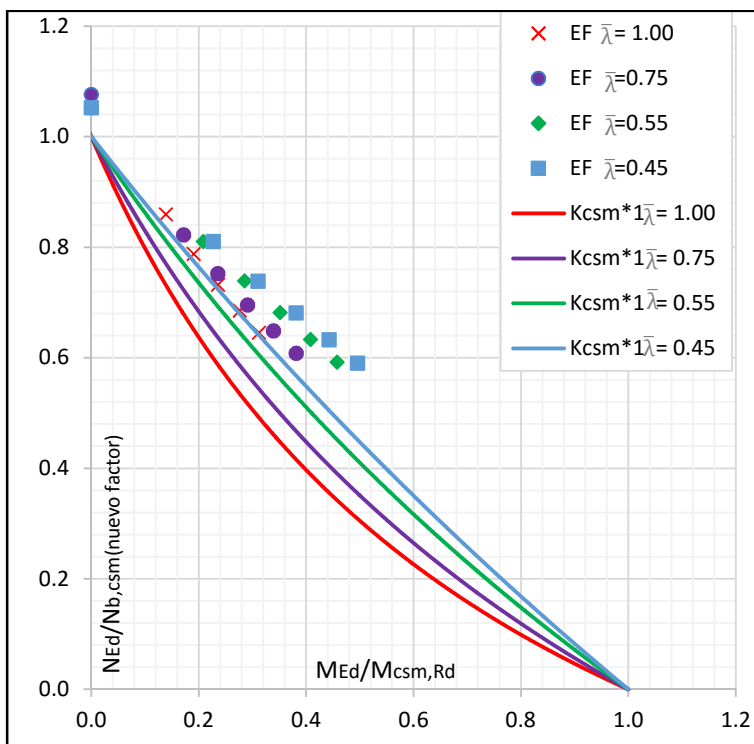


Figura 63 Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X3.5 – dúplex).

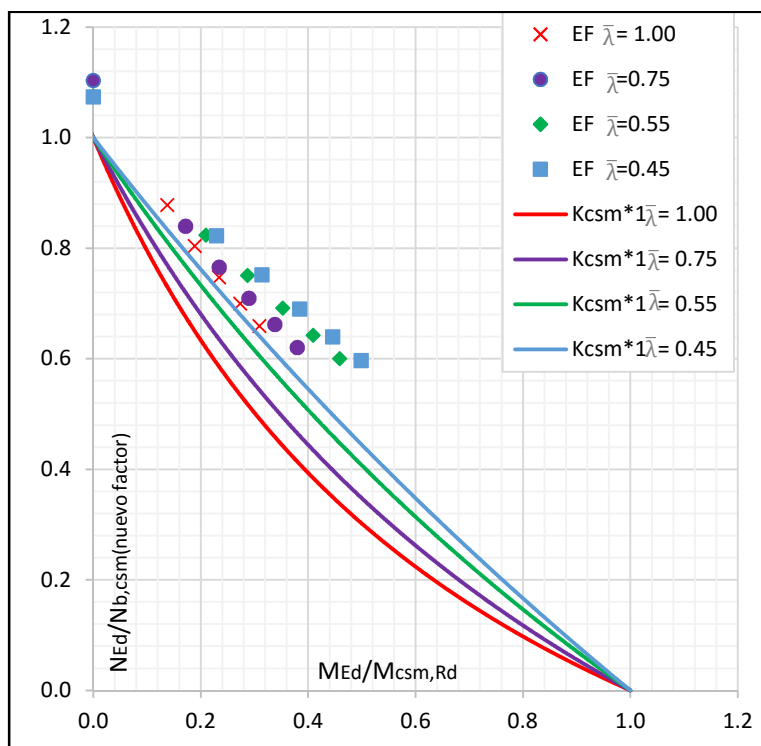


Figura 64 Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X4 – dúplex).

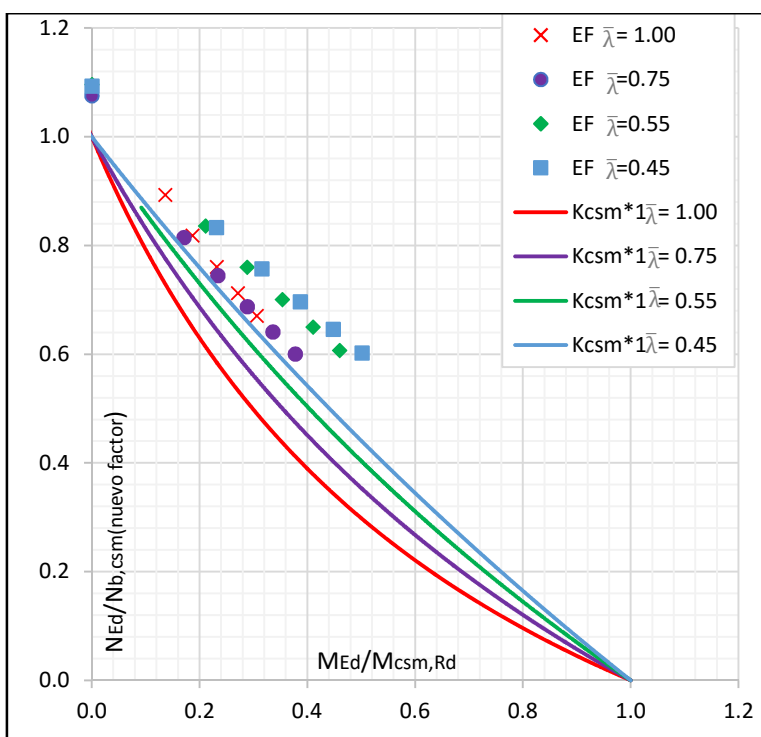


Figura 65 Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X4.5 – dúplex).

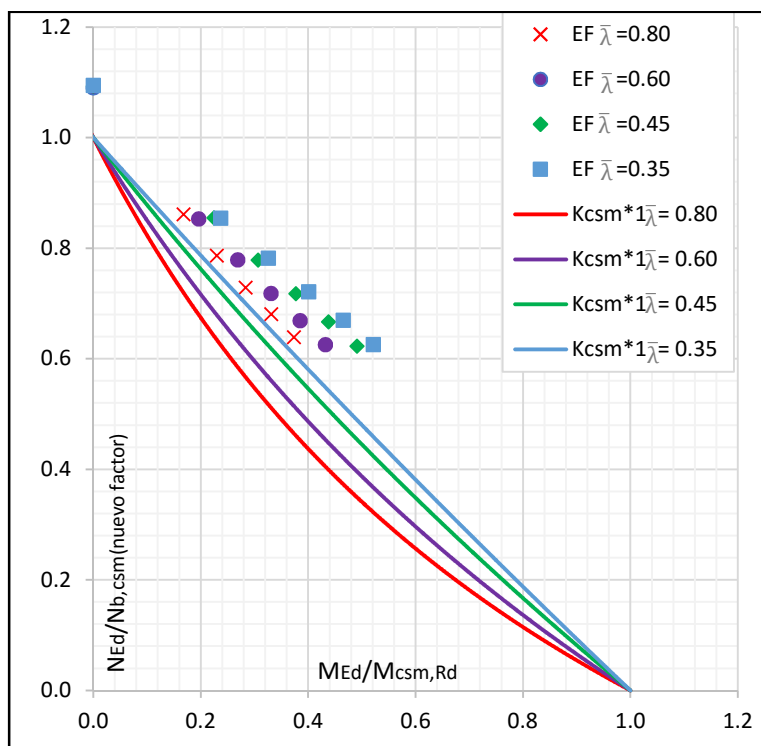


Figura 66 Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X3– ferrítico).

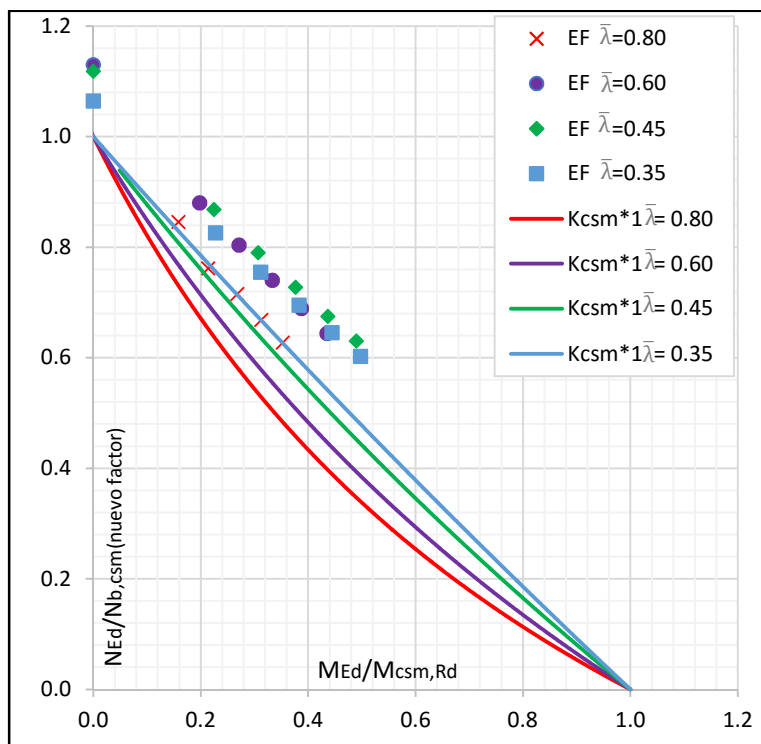


Figura 67 Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X3.5– ferrítico).

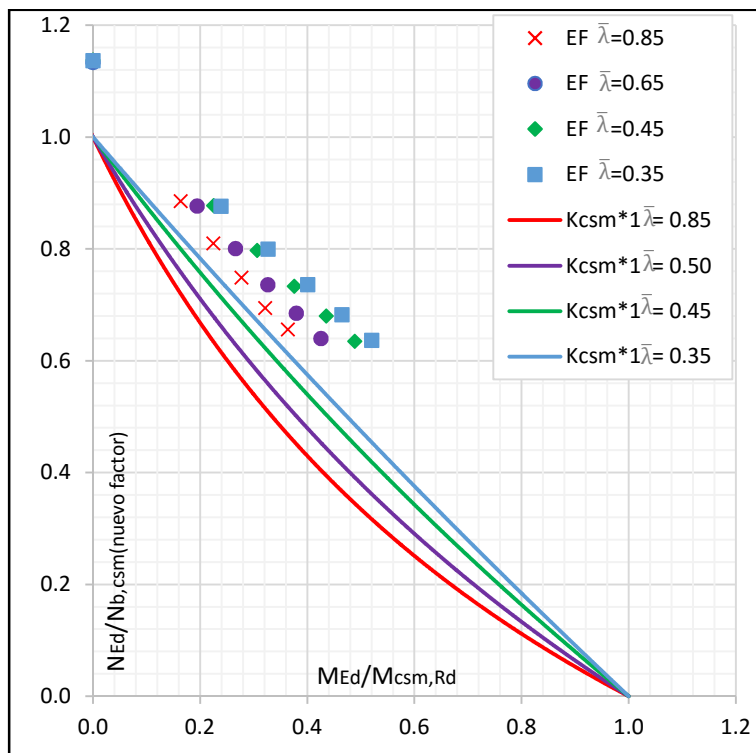


Figura 68 Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X4– ferrítico).

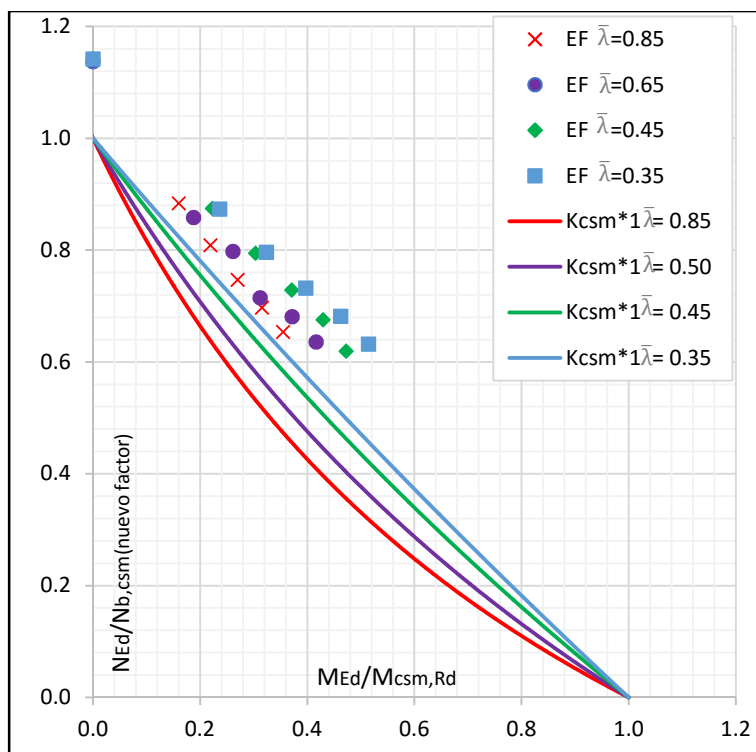


Figura 69 Curva de interacción de la propuesta con el nuevo factor (SHS 60X60X4.5– ferrítico).

6.3.1 Comparación de los resultados con la nueva propuesta para el factor de interacción

Se presenta una comparación de los resultados obtenidos con la nueva propuesta para el cálculo del factor de interacción, donde se puede apreciar que el nuevo enfoque produce un mejor grado de precisión y consistencia en las predicciones con respecto al código EN1993-1-4 [9]. Los resultados se muestran de la Figura 70 a la Figura 72. En la Tabla 61 se presentan los coeficientes de variación (COV) y las medias de las propuestas en estudio.

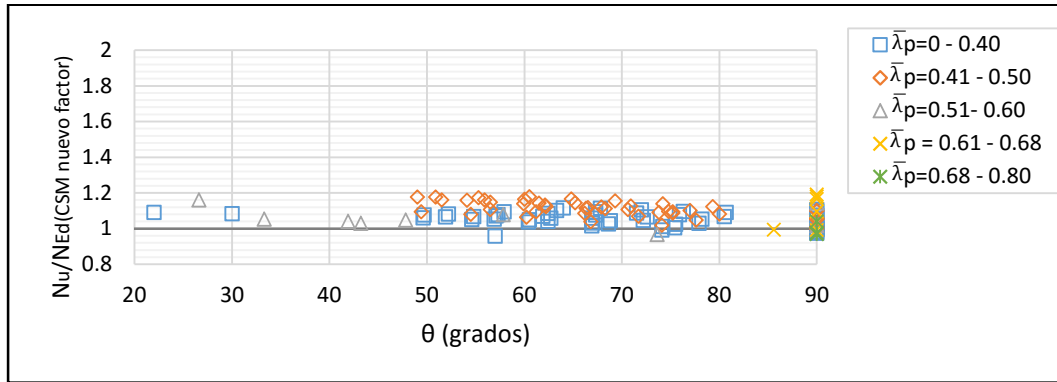


Figura 70 Comparación de los resultados con la nueva propuesta CSM (austeníticos).

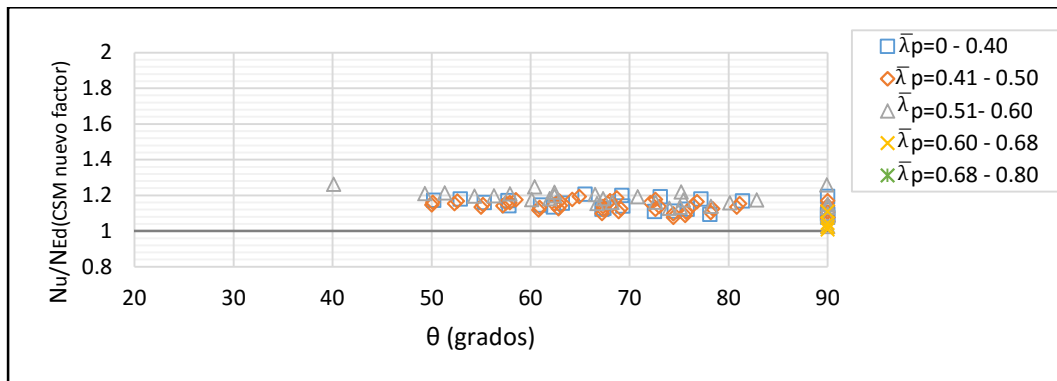


Figura 71 Comparación de los resultados con la nueva propuesta CSM (dúplex).

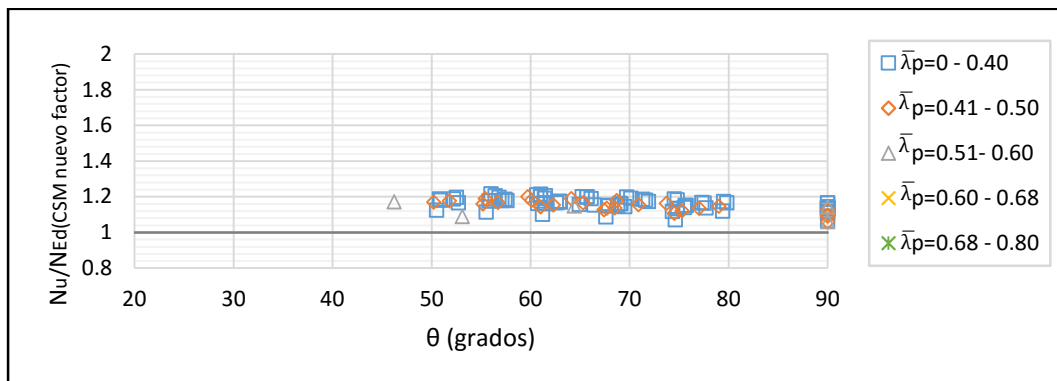


Figura 72 Comparación de los resultados con la nueva propuesta CSM (ferríticos).

Se destacan los resultados obtenidos de la segunda propuesta de tesis con el nuevo factor de interacción, la cual ofrece un equilibrio entre precisión y practicidad. Los resultados del coeficiente de variación y los valores medios de la relación N_u/N_{Ed} se muestran en la Tabla 61.

Tabla 61 Medias y coeficientes de variación de las propuestas (austeníticos, dúplex y ferríticos).

Tipo de acero inoxidable		N_u	N_u	N_u	N_u
		$N_{Ed(CSM \text{ nuevo fact.})}$	$N_{Ed(CSM \text{ Tesis})}$	$N_{Ed(CSM \text{ O.Zhao})}$	$N_{Ed(EN1993)}$
Austeníticos	Media	1.08	1.08	1.14	1.18
	COV	0.05	0.05	0.05	0.09
Dúplex	Media	1.14	1.11	1.14	1.17
	COV	0.04	0.03	0.03	0.05
Ferríticos	Media	1.16	1.10	1.11	1.17
	COV	0.03	0.02	0.02	0.05

6.4 Validación estadística

Se presenta un estudio estadístico de confiabilidad de los resultados obtenidos para validar el grado de seguridad de cada propuesta. La validación se ha determinado de acuerdo a las especificaciones de EN1990, anexo D (2005) [29] y estudios complementarios [30][33]. Los datos experimentales y numéricos considerados en los análisis de confiabilidad se muestran de la Figura 73 a la Figura 84, donde se comparan con los resultados obtenidos de acuerdo a las expresiones del código EN1993-1-4 [9], y las propuestas presentadas con el CSM. Se resumen los parámetros estadísticos para cada método de la Tabla 62 a la Tabla 64, donde b es el factor de corrección de los resultados, $V\delta$ es el coeficiente de variación de las pruebas y las simulaciones de EF, Vr es el coeficiente de variación combinado que incorpora incertidumbres variables y γ_{M1} es el factor de seguridad para inestabilidad calculado.

Para garantizar un grado de seguridad en los métodos propuestos, el valor del factor de seguridad γ_{M1} deberá ser menor o igual a 1.10, cuyo valor corresponde al factor de seguridad mínimo establecido por el código EN1993-1-4 [9].

Tabla 62 Resumen de validación estadística acero inoxidable austenítico

Tipo	Propuesta	Nº elementos	b	$V\delta$	Vr	γ_{M1}
Austenítico	CSM nuevo factor	123	1.04	0.05	0.10	1.10
	CSM tesis	123	1.05	0.05	0.10	1.10
	CSM O. Zhao	123	1.09	0.05	0.10	1.04
	EN1993-1-4	123	1.21	0.09	0.12	0.98

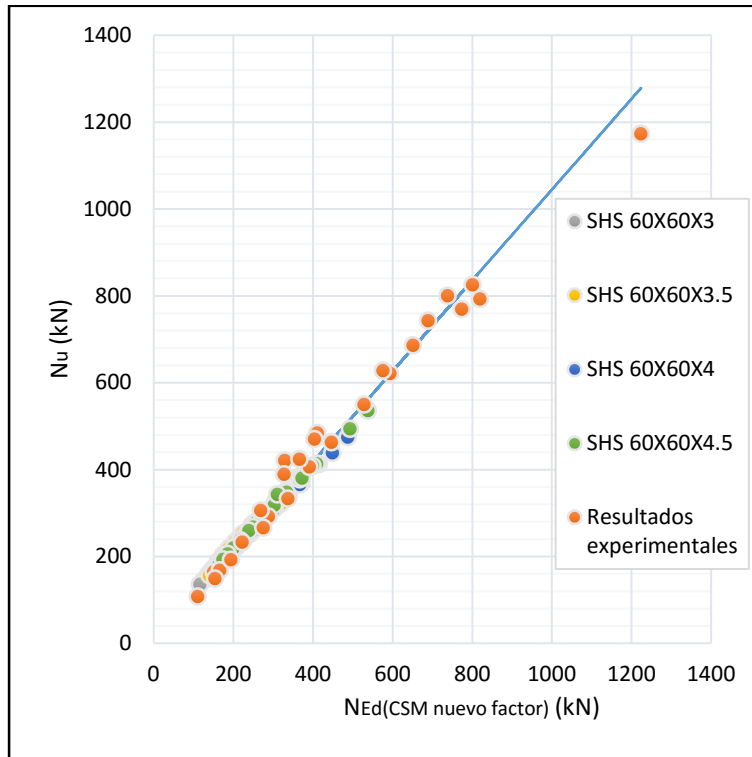


Figura 73 Estudio de validación estadística con la propuesta del nuevo factor (austeníticos).

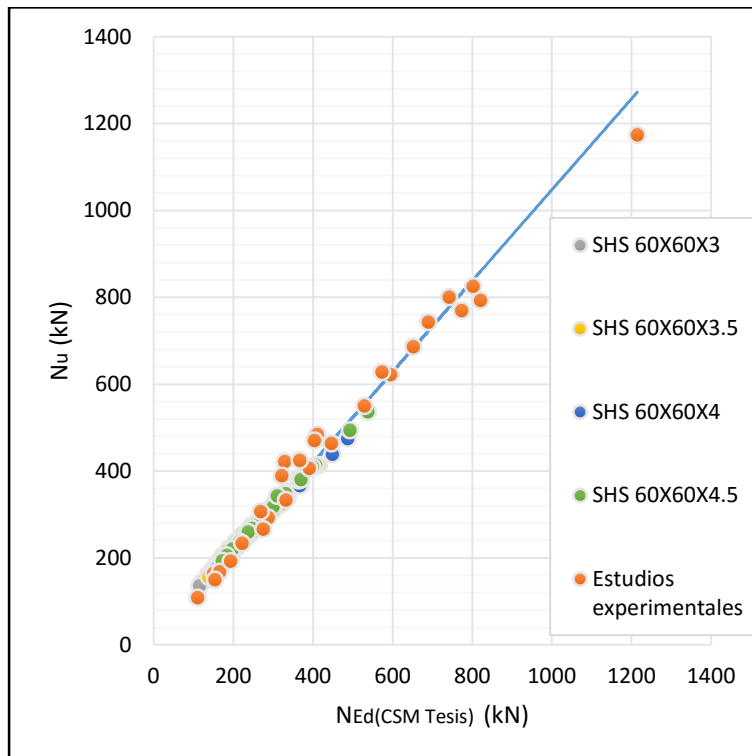


Figura 74 Estudio de validación estadística con la propuesta de tesis (austeníticos).

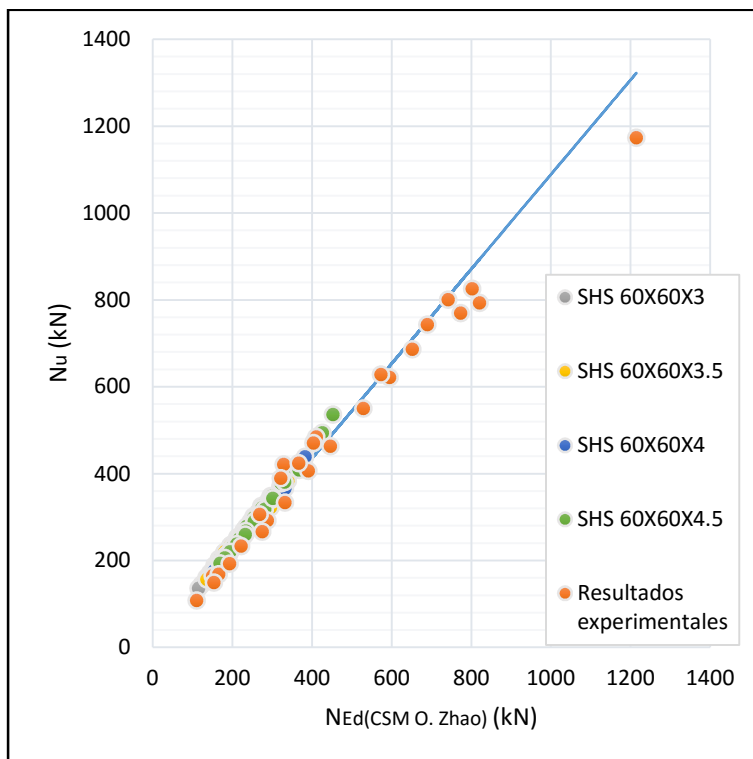


Figura 75 Estudio de validación estadística con la propuesta de O. Zhao (austeníticos).

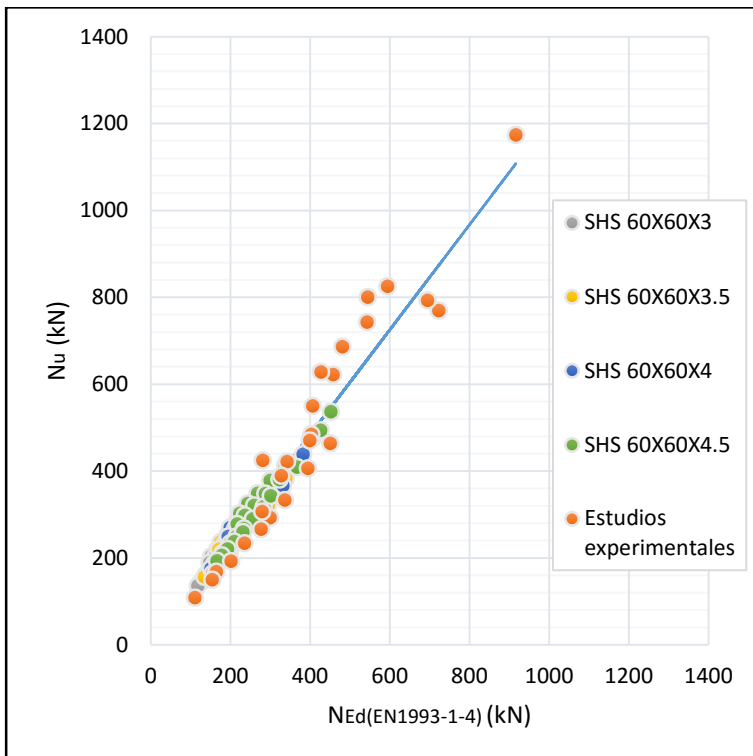


Figura 76 Estudio de validación estadística con el código EN1993-1-4 (austeníticos).

Tabla 63 Resumen de validación estadística acero inoxidable dúplex.

Tipo	Propuesta	Nº elementos	b	Vδ	Vr	γ_{M1}
Dúplex	CSM nuevo factor	109	1.13	0.05	0.08	1.07
	CSM tesis	109	1.10	0.03	0.08	1.07
	CSM O. Zhao	109	1.15	0.03	0.08	1.03
	EN1993-1-4	109	1.18	0.05	0.08	1.02

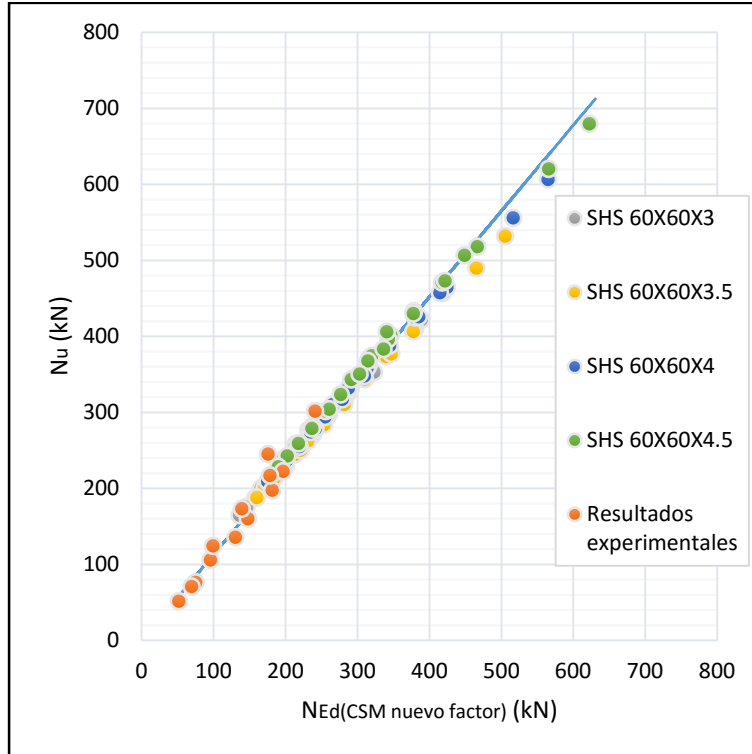


Figura 77 Estudio de validación estadística con la propuesta del nuevo factor (dúplex).

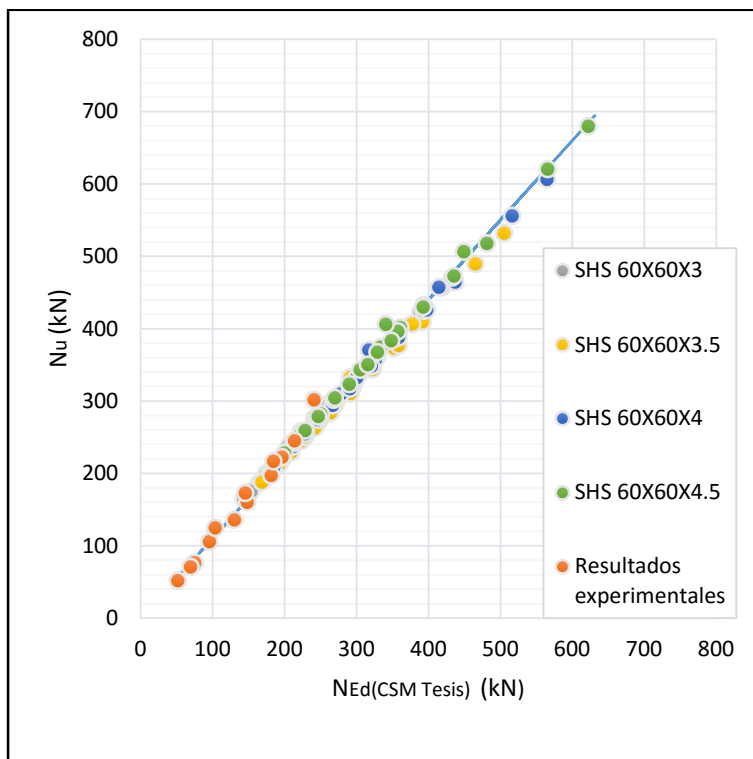


Figura 78 Estudio de validación estadística con la propuesta de tesis (dúplex).

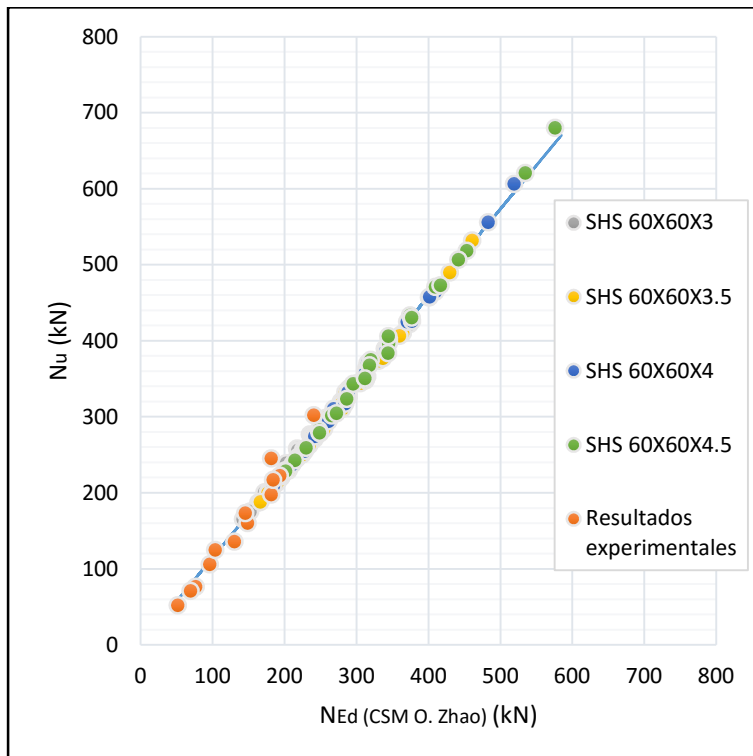


Figura 79 Estudio de validación estadística con la propuesta de O. Zhao (dúplex).

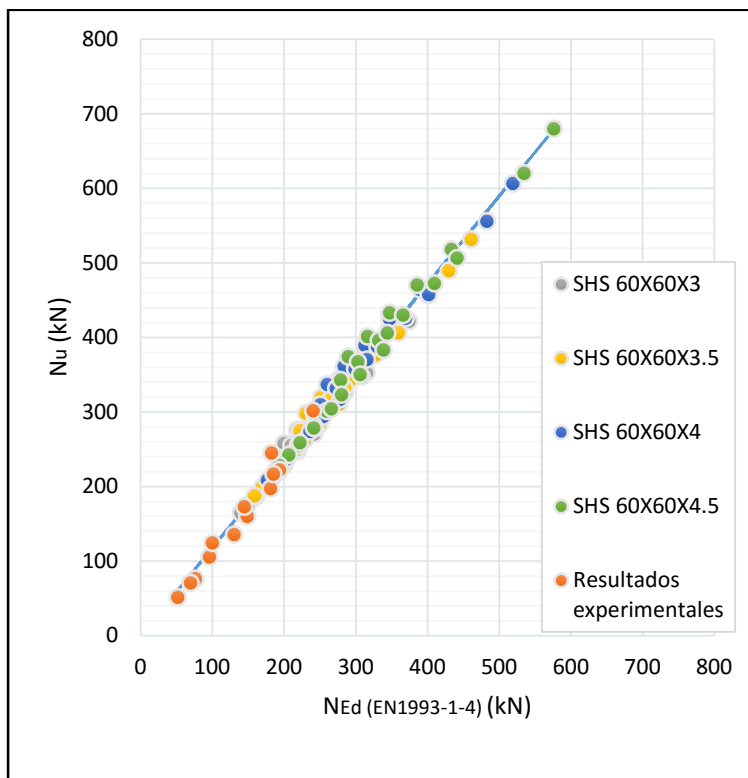


Figura 80 Estudio de validación estadística con el código EN1993-1-4 (dúplex).

Tabla 64 Resumen de validación estadística acero inoxidable ferrítico.

Tipo	Propuesta	Nº elementos	b	Vδ	Vr	γ_{M1}
Ferrítico	CSM nuevo factor	103	1.15	0.03	0.09	1.05
	CSM tesis	103	1.11	0.02	0.09	1.06
	CSM O. Zhao	103	1.11	0.02	0.09	1.02
	EN1993-1-4	103	1.17	0.05	0.10	1.00

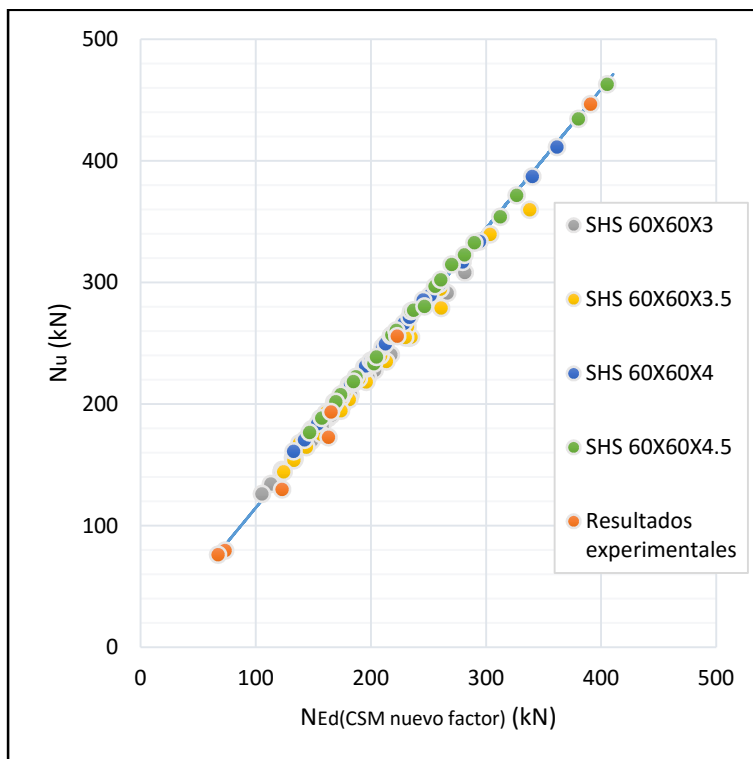


Figura 81 Estudio de validación estadística con la propuesta del nuevo factor (ferrítico).

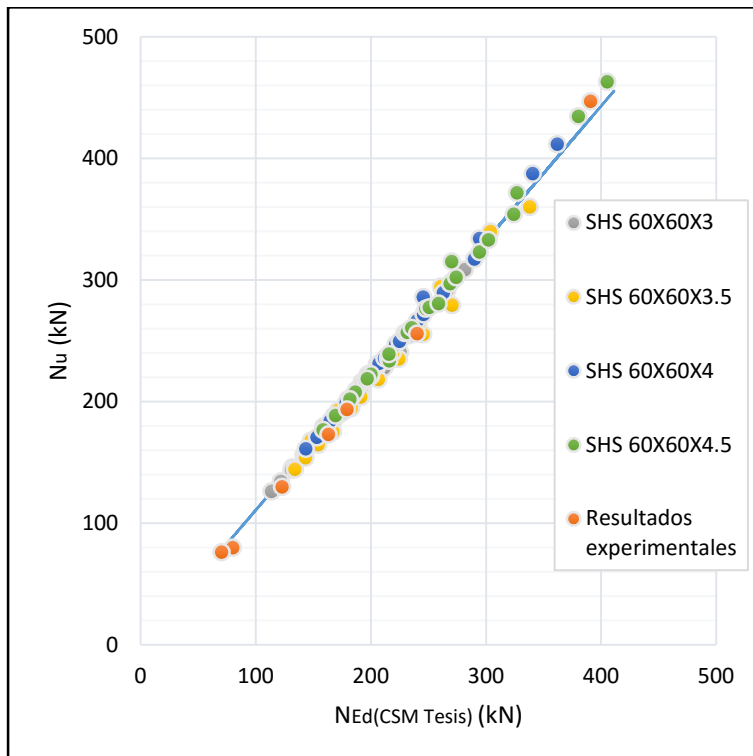


Figura 82 Estudio de validación estadística con la propuesta de tesis (ferrítico).

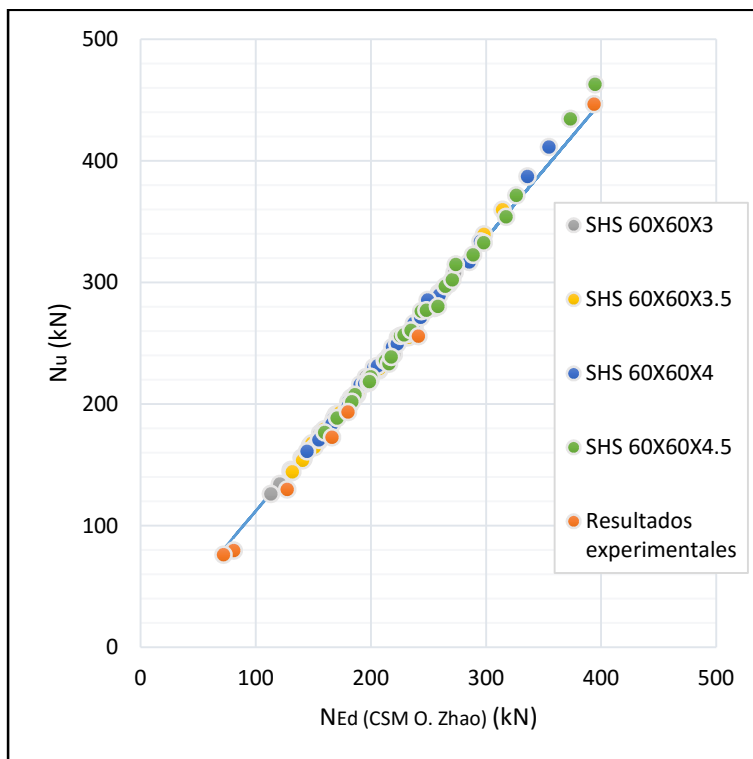


Figura 83 Estudio de validación estadística con la propuesta de O. Zhao (ferrítico).

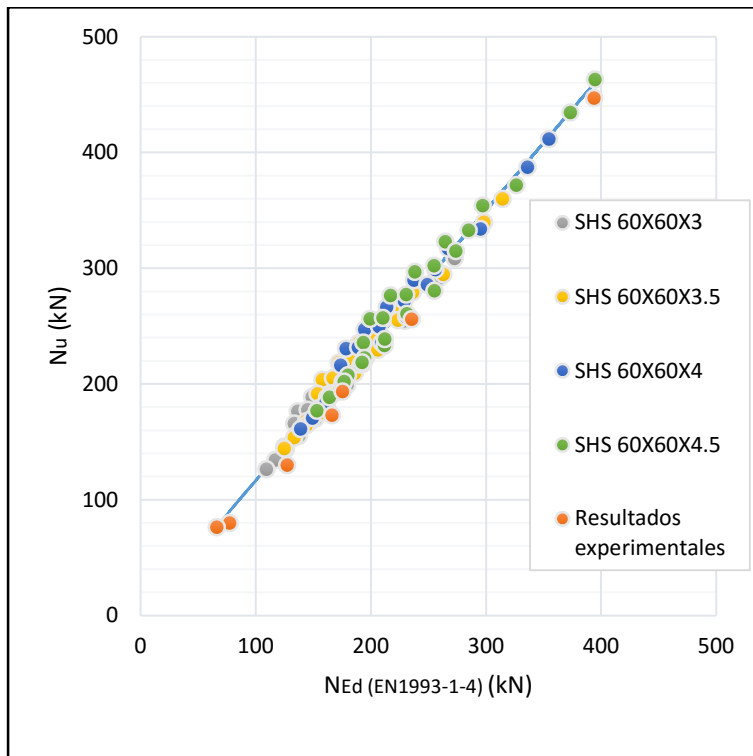


Figura 84 Estudio de validación estadística con el código EN1993-1-4 (ferrítico).

6.5 Análisis de los resultados

Se ha demostrado que el CSM es un método eficiente y muy útil para la predicción de la resistencia a pandeo por flexión. En este proyecto de tesis se han analizado tres tipos de propuestas, las cuales se han explicado en capítulos anteriores y se aborda brevemente a continuación:

La propuesta realizada por O. Zhao para el cálculo de la interacción considera la resistencia al pandeo por flexión $N_{b,Rd}$ de acuerdo a las expresiones del código EN1993-1-4 [9], y la resistencia a flexión por el CSM en la interacción de carga combinada. El factor de interacción de la propuesta de O. Zhao, se encuentra en el manual de diseño para acero inoxidable estructural [1].

La primera propuesta de tesis considera la resistencia al pandeo por flexión y la resistencia a flexión CSM en la interacción de carga combinada.

La segunda propuesta de tesis contiene un nuevo factor de interacción que permite unificar los coeficientes para los tres tipos de aceros inoxidables. Para el cálculo de la interacción de carga combinada se considera la resistencia al pandeo por flexión y la resistencia a flexión CSM.

En esta sección, se presentan gráficas esquemáticas para ayudar a interpretar los resultados, para lo cual se propone identificar el porcentaje de resultados a través del siguiente rango: predicción insegura $N_u/N_{Ed} < 0.98$, predicción real $0.99 < N_u/N_{Ed} < 1.10$, predicción conservadora $1.11 < N_u/N_{Ed} < 1.25$ y predicción muy conservadora $N_u/N_{Ed} > 1.26$. Los resultados se muestran de la Figura 85 a la Figura 90.

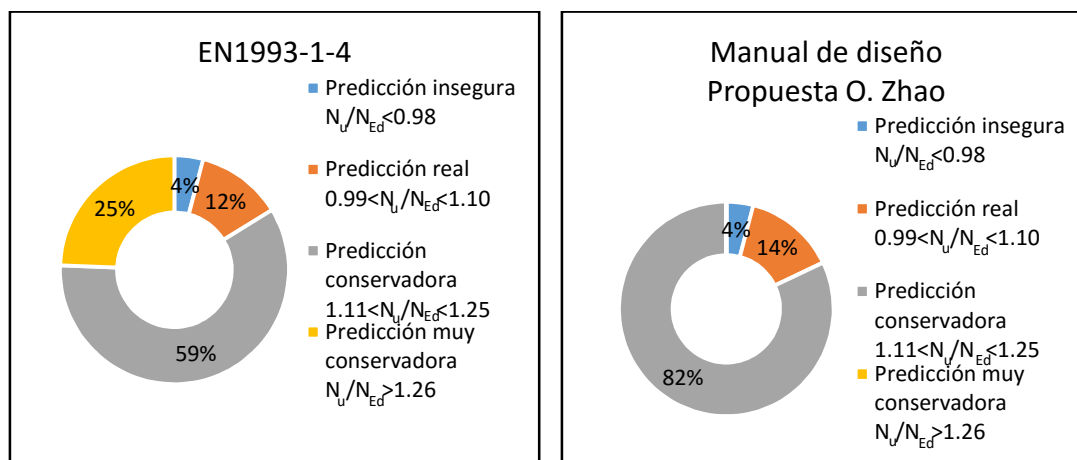


Figura 85 Evaluación de los resultados del código EN1993-1-4 y la propuesta O. Zhao (austenítico)

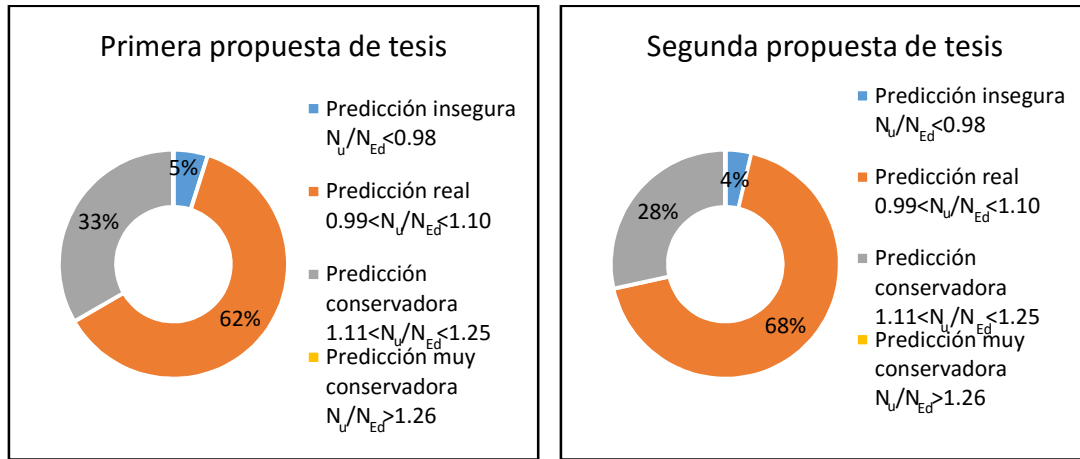


Figura 86 Evaluación de los resultados de las propuestas de tesis (austenítico).

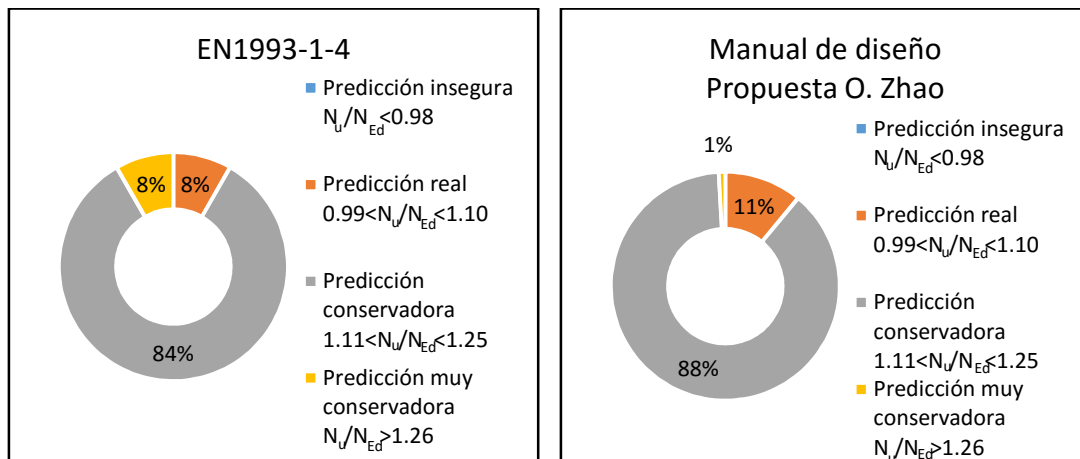


Figura 87 Evaluación de los resultados del código EN1993-1-4 y la propuesta O. Zhao (dúplex)

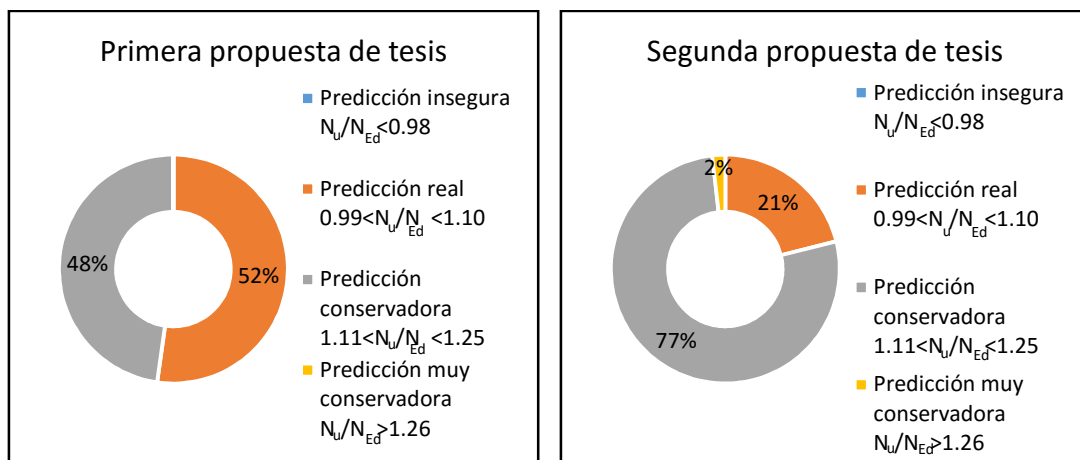


Figura 88 Evaluación de los resultados de las propuestas de tesis (dúplex).

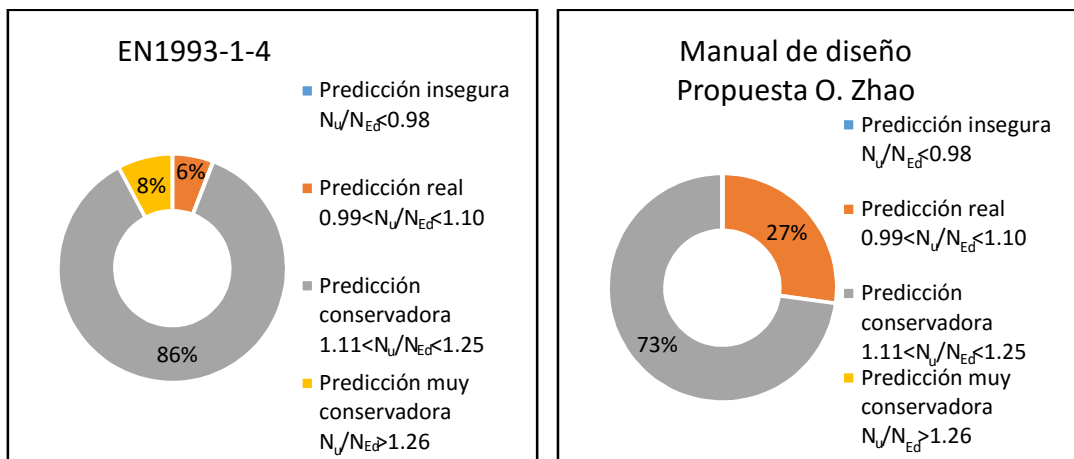


Figura 89 Evaluación de los resultados del código EN1993-1-4 y la propuesta O. Zhao (ferrítico)

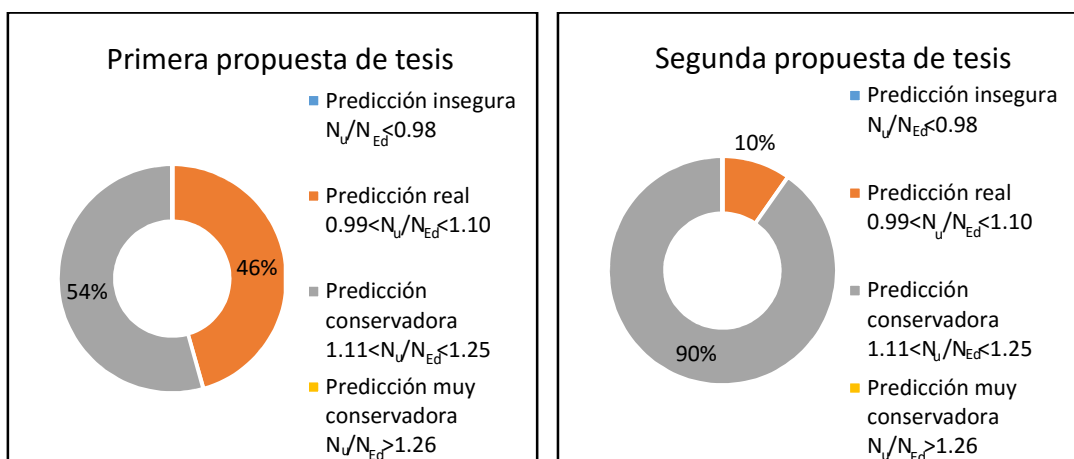


Figura 90 Evaluación de los resultados de las propuestas de tesis (ferrítico).

Análisis de los resultados

Para el análisis del acero inoxidable austenítico se han realizado 123 modelos para cada propuesta de estudio. Los resultados permiten concluir que las predicciones obtenidas con el Eurocódigo son muy conservadoras, el resultado más real y exacto se obtiene con la utilización del CSM, el cual es un método que permite captar con exactitud la predicción de la resistencia de los elementos de acero inoxidable. La propuesta que muestra mayor exactitud es la segunda propuesta de tesis, la cual contiene un factor de interacción unificado para los tres tipos de aceros inoxidables, y considera la resistencia al pandeo por flexión $N_{b,CSM}$ y la resistencia a flexión $M_{CSM,Rd}$. Los resultados inseguros se compensan con la utilización del factor de seguridad.

Para el análisis del acero inoxidable dúplex se ha realizado 109 modelos para cada propuesta de estudio. De igual manera que los aceros austeníticos, los resultados del acero inoxidable dúplex

permiten concluir que las predicciones obtenidas con el Eurocódigo son muy conservadoras, el resultado más real y exacto se obtiene con la utilización del CSM, la propuesta que muestra mayor exactitud es la primera propuesta de tesis, la cual considera la resistencia al pandeo por flexión $N_{b,CSM}$ y la resistencia a flexión $M_{CSM,Rd}$.

Para el análisis del acero inoxidable ferrítico se han realizado 103 modelos para cada propuesta de estudio. El grado de endurecimiento por deformación del acero inoxidable ferrítico es mucho menor a los grados inoxidables austenítico y dúplex. El comportamiento es más real para la primera propuesta de tesis, la cual considera la resistencia al pandeo por flexión $N_{b,CSM}$ y la resistencia a flexión $M_{CSM,Rd}$.

El CSM permite obtener resultados más uniformes para los estados de carga combinada, este beneficio no lo encontramos con las expresiones del código EN1993-1-4 [9], las cuales muestran una dispersión creciente a medida que se aumenta la flexión.

Se puede apreciar un mayor porcentaje de los resultados conservadores en el acero inoxidable ferrítico con respecto al acero inoxidable austenítico y dúplex, sin embargo, los resultados del acero inoxidable ferrítico suelen ser más uniformes y casi no se produce dispersión de datos, es decir las relaciones N_u/N_{Ed} son uniformes para casi todas las condiciones de carga excéntrica, esta conclusión se basa de la Figura 52 a la Figura 54, donde podemos observar que la nube de puntos es uniforme para las expresiones del código EN1993-1-4 [9], y las propuestas de tesis.

Se puede evidenciar que la segunda propuesta de tesis no es tan favorable para el acero inoxidable ferrítico. La razón principal es porque los coeficientes de interacción fueron dispuestos para que el acero inoxidable austenítico tenga el mayor beneficio, porque posee mayor grado de endurecimiento por deformación con relación al acero inoxidable ferrítico. El objetivo de la nueva propuesta es obtener una expresión general para los tres tipos de aceros inoxidables más comunes, la cual permita considerar el endurecimiento por deformación en las predicciones de la resistencia al pandeo por flexión y ofrezca una simplificación en el cálculo de la interacción.

6.6 Conclusiones

En este capítulo se ha expuesto los resultados obtenidos del estudio paramétrico, a través de gráficas y esquemas, las cuales han permitido captar la diferencia entre cada propuesta y método utilizado.

Es evidente que el continuous strength method CSM ofrece un mayor grado de exactitud en el cálculo del pandeo a flexión para carga combinada, con relación a las expresiones de diseño del código EN1993-1-4 [9]. La principal razón es porque el CSM considera el endurecimiento por deformación que poseen los aceros inoxidables. Para captar el comportamiento real y más exacto

es imprescindible considerar la resistencia al pandeo por flexión y la resistencia a flexión con el continuous strength method CSM, lo cual conlleva a la estimación de nuevos puntos en la curva de interacción.

Los resultados de la predicción de resistencia con el continuous strength method CSM permiten abordar una nueva propuesta, la cual considera el factor de interacción con coeficientes generales para los tres tipos de aceros inoxidables. El principal beneficio de la nueva propuesta para el factor de interacción, es ofrecer una expresión exacta y general para la predicción de la interacción de compresión más flexión en secciones rectangulares, para los tres tipos de aceros inoxidables más utilizados.

Los resultados del estudio paramétrico han permitido validar la eficiencia y confiabilidad de las propuestas. Se ha verificado el grado de seguridad con un estudio estadístico, cuyo resultado ha sido satisfactorio.

7 CONCLUSIONES

En este capítulo se resumen las principales conclusiones del estudio, mientras que se puede encontrar comentarios más detallados al final de cada capítulo.

El acero inoxidable es un material con una combinación de propiedades únicas, como su resistencia inigualable a la corrosión, su atractivo estético y las propiedades mecánicas favorables. Sin embargo, las cualidades son generalmente despreciadas por el alto costo del material, por lo cual es imprescindible el estudio de la eficiencia en el diseño estructural.

En la actualidad, el diseño de elementos de acero inoxidable ha sido determinado por las especificaciones establecidas en el código EN1993-1-4 [9], las cuales se basan en la teoría del comportamiento del acero al carbono, sin tomar en cuenta las propiedades específicas del acero inoxidable, en especial la gran capacidad de aumentar la resistencia durante su proceso de deformación.

La comunidad científica ha desarrollado el continuous strength method CSM, el cual se basa en el comportamiento no lineal y los efectos de endurecimiento por deformación del acero inoxidable, lo que permite tener predicciones más reales de la resistencia de los elementos estructurales.

Actualmente el CSM permite predecir la resistencia de las secciones transversales a compresión, flexión y carga combinada. Sin embargo, todavía no se han desarrollado formalmente expresiones que permitan conocer el comportamiento del elemento estructural considerando el pandeo por flexión.

En el presente estudio se abordó el tema de la investigación al pandeo por flexión sistemáticamente, donde se inició el estudio con una calibración del modelo utilizando ensayos y estudios experimentales validados.

Para obtener datos de rendimiento, el modelo de investigación en el estudio paramétrico fue una sección de dimensiones previamente establecida con un rango variable de longitudes. La muestra fue sometida a una carga de compresión y flexión más compresión, a través de la variación de la excentricidad. El modelo fue dispuesto para obtener un diagrama de momento uniforme. El resultado del análisis fue la carga última de falla. Simultáneamente se determinó las predicciones de resistencia de diseño a pandeo por flexión, establecidas en el código EN1993-1-4 [9], y el continuous strength method CSM. Por consiguiente, se concluyó que las expresiones del código EN1993-1-4 [9], proporcionan predicciones muy conservadoras con respecto a las propuestas realizadas con el continuous strength method CSM. La razón principal es la falta de consideración del endurecimiento por deformación en las expresiones del código EN1993-1-4 [9], mientras que el

CSM estima adecuadamente la capacidad del endurecimiento por deformación que posee el acero inoxidable.

Se propuso determinar la interacción a carga combinada con el continuous strength method CSM, donde se demostró el alto grado de exactitud al considerar el pandeo a flexión y la resistencia a flexión con el CSM. No solo se determinó datos más reales y exactos que los obtenidos con el código EN1993-1-4 [9], sino también más uniformes para los tres principales tipos de aceros inoxidables.

El resultado de la comparación de las predicciones de resistencia con el CSM y las expresiones del código EN1993-1-4 [9], permitió proponer una nueva expresión para el cálculo del factor de interacción. El principal beneficio de la nueva propuesta para el cálculo del factor de interacción, es ofrecer una ecuación única para los tres tipos de aceros inoxidables austenítico, dúplex y ferrítico, donde se simplifica el proceso de cálculo a través de coeficientes generales. La nueva propuesta ofrece predicciones de resistencia más exactas que el código EN1993-1-4 [9].

El grado de seguridad se evaluó a través de un análisis estadístico con las expresiones de EN1990 anexo D [29], donde se obtuvo un grado de seguridad adecuado para cada propuesta, con factores de seguridad γ_{M1} menores a 1.10 para todos los métodos propuestos.

7.1 Sugerencias para futuras investigaciones

En esta sección se exponen recomendaciones para ampliar la investigación en futuros estudios.

La presente investigación se centró en el estudio de elementos de secciones rectangulares SHS y RHS, sometidos a carga combinada de flexión más compresión para secciones no esbeltas. Para investigaciones futuras se podría extender la investigación a secciones esbeltas considerando secciones clase 4.

La investigación se centró en perfiles rectangulares SHS y RHS. También se podría extender la aplicación a otras secciones, para cubrir otros tipos de perfiles como: perfiles circulares CHS y secciones de ángulo o secciones I.

La investigación utilizó como objeto de estudio un elemento con condiciones de contorno específicas, el cual proporcionó un diagrama de momento uniforme. Para investigaciones futuras se podría extender la investigación a elementos con otras condiciones de contorno.

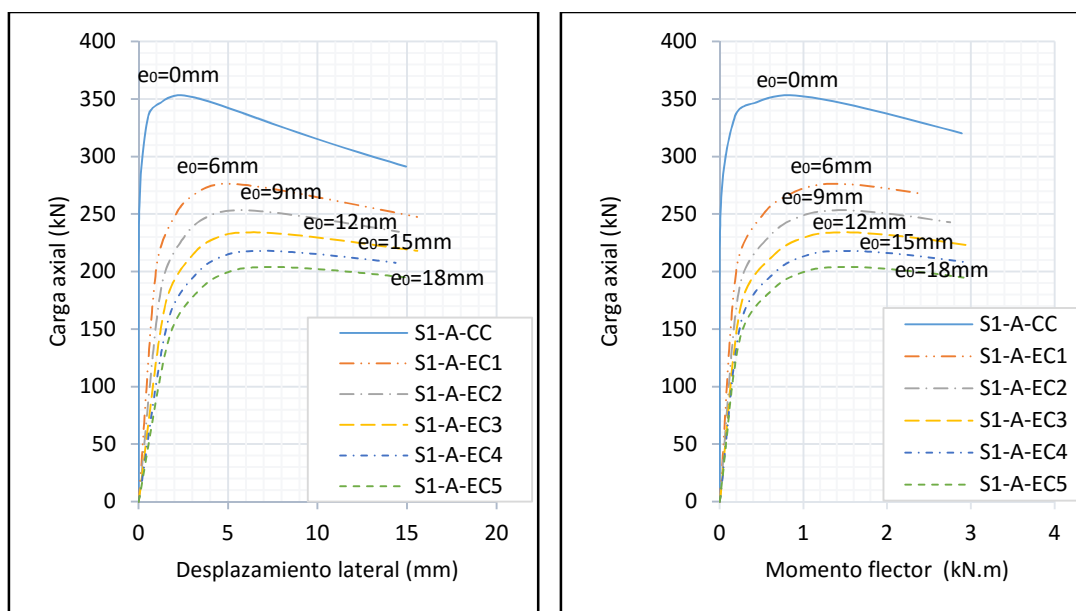
8 REFERENCIAS

- [1] Euro Inox. (2017). Manual de Diseño para Acero Inoxidable Estructural, 4ª Edición.
- [2] Instituto Técnico de la Estructura en Acero. (2016). Acero Inoxidable, Índice del tomo 22.
- [3] F. Picci. (2014). Structural behavior of Ferritic stainless Steel columns subjected to combined loading Thesis. Departament of Civil and Environmental, Engineering Universitat Politecnica de Catalunya. Barcelona, España.
- [4] W. Ramberg, W. Osgood. (1943). Description of stress-strain curves by three parameters. Technical Note N° 902. National Advisory Committee for Aeronautics. Washington, D.C, USA.
- [5] N. Hill. (1994). Determination of stress-strain relations from "offset" yield strength values, Technical Note No. 927. National Advisory Committee for Aeronautics. Washington, D.C, USA.
- [6] E. Mirambell, E. Real. (2000). On the calculation of deflections in structural stainless steel beams: an experimental and numerical investigation. Journal of Constructional Steel Research, 54(1), 109–133.
- [7] K. Rasmussen. (2003). Full-range stress–strain curves for stainless steel alloys. Journal of Constructional Steel Research, 59(1), 47-61.
- [8] L. Gardner, M.Theofanous. (2008). Discrete and continuous treatment of local buckling in stainless steel elements. Journal of Constructional Steel Research, 64(11), 1207-1216.
- [9] European Committee for Standardization. (2006). EN1993-1-4. European Committee for Standardization Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1–4, General rules. Supplementary rules for stainless steels. Brussels, Belgium
- [10] B. Schafer, S. Ádány S. (2006). Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM conventional and constrained finite strip methods. Proceedings of the 18th International Specialty Conference on Cold-formed Steel Structures, 39–54.
- [11] European Committee for Standardization. (2006). EN1993-1-5. European Committee for Standardization Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-5, Plated structural elements. Brussels, Belgium.
- [12] I. Arrayago, E. Real, E Mirambell, L. Gardener. (2017). The Continuous Strength Method for stainless steel columns. Stainless Steel in Structures, Fifth International Experts Seminar. London, UK.
- [13] O. Zhao. (2015). Structural Behaviour of stainless steel Elements Subjected to combined loading Doctoral Thesis. Departament of Civil and Environmental, Imperial College London, 200–275.
- [14] L. Gardner, D. Nethercot. (2004). Numerical modelling of stainless steel structural components-a consistent approach. Journal of Structural Engineering. 130(10), 1586–1601.

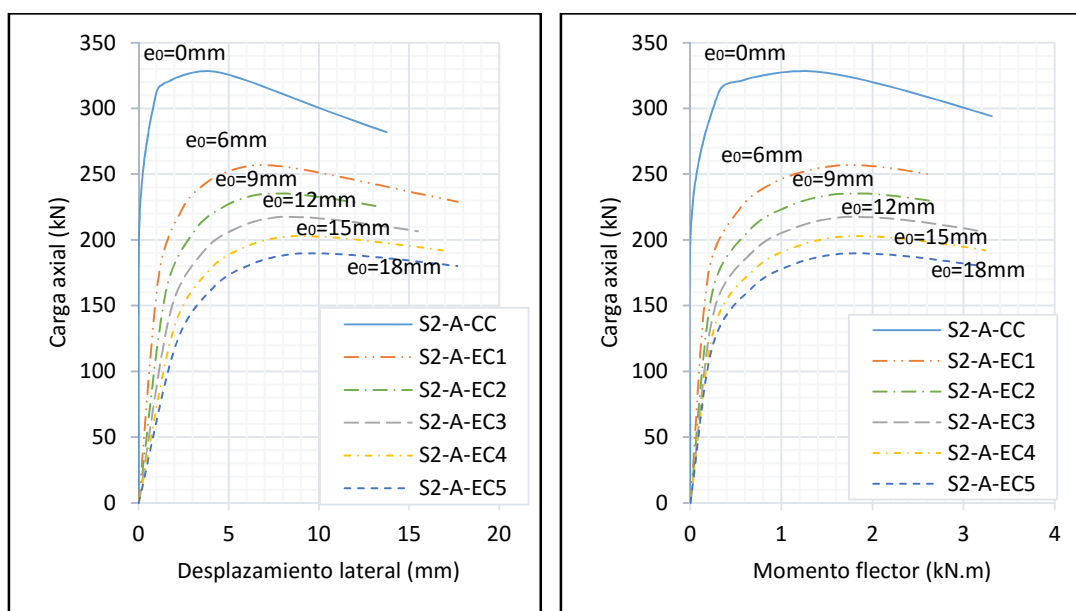
-
- [15] L. Gardner, A. Talja, y N. Badoo. (2006). Structural design of high-strength austenitic stainless steel. *Thin-Walled Structures*, 44(5), 517–528.
- [16] Y.Liu, B. Young. (2003). Buckling of stainless steel square hollow section compression members. *Journal of Constructional Steel Research*, 59, 165-177.
- [17] O. Zhao, B. Rossi, L. Gardner, B. Young. (2015). Behaviour of Structural stainless steel cross-sections under combined loading-Part I, Experimental study. *Engineering Structures*, 89, 236-246.
- [18] W. Lui, M. Ashraf, B. Young. (2014). Tests of cold-formed duplex stainless steel SHS beam-columns. *Eng Struct*, 74, 111–21.
- [19] B. Young, W. Lui. (2006). Tests on cold formed high strength stainless steel compression members. *Thin-Walled Structures*, 44(2), 224–234.
- [20] Y. Huang, B. Young. (2014). Experimental investigation of cold-formed lean duplex stainless steel beam-columns. *Thin-Walled Structures* 76, 105-117.
- [21] Hibbitt, Karlsson, Sorensen. (2006). Abaqus. abaqus/standard user's manual volumes i-iii and abaqus cae manual. version 6.6.
- [22] I. Arrayago. (2016). New approach for efficient design of stainless Steel RHS and SHS elements Doctoral Thesis. Departament of Civil and Environmental, Engineering Universitat Politecnica de Catalunya. Barcelona, España.
- [23] P. Hradil, A. Talja . (2013). Investigating the role of gradual yielding in stainless steel columns and beams by virtual testing. *Proceedings of The Fifth International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation*. Cape Town, South Africa, 1459–1464.
- [24] M. Theofanous, L. Gardner. (2010). Experimental and numerical studies on lean duplex stainless steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 66(6), 816–825.
- [25] L. Gardner, M. Ashraf. (2006). Structural design for non linear metallic material. *Engineering Structures*, 28(6), 926–934.
- [26] R. Chacón. (2018). Analisis no lineal de estructuras de acero Material del aula métodos incrementales, Universidad Politecnica de Catalunya.
- [27] S. Ashan, O. Zhao, L. Gardner. (2019). Standardised material properties for numerical parametric studies of stainless Steel structures and buckling curves for tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 152, 2-11.
- [28] M. Theofanous and L. Gardne. (2009). Testing and numerical modelling of lean duplex stainless steel hollow section columns. *Engineering Structures*, 31:3047–3058.
- [29] European Committee for Standardization. (2005). EN1990. European Committee for Standardization Eurocode. Basis of structural design. Brussels, Belgium.

- [30] T. Tankova, L. Simoes da Silva, L. Marques, C. Rebelo. y A. Taras. (2014). Towards a standardized procedure for the safety assessment of stability design rules. *Journal of Constructional Steel Research*, 103, 290–302.
- [31] L. Gardner. (2002). A new approach to structural stainless steel design Doctoral Thesis. Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, UK.
- [32] L. Gardner, A. Talja, N. Baddoo. (2006). Structural design of high-strength austenitic stainless steel. *Thin-Walled Structures*, 44(5), 517–52.
- [33] S. Afshan, P. Francis, N.R. Baddoo, L. Gardner. (2015). Reliability analysis of structural stainless Steel design provisions. *Journal of Constructional Steel Research*, 114, 2093-304.

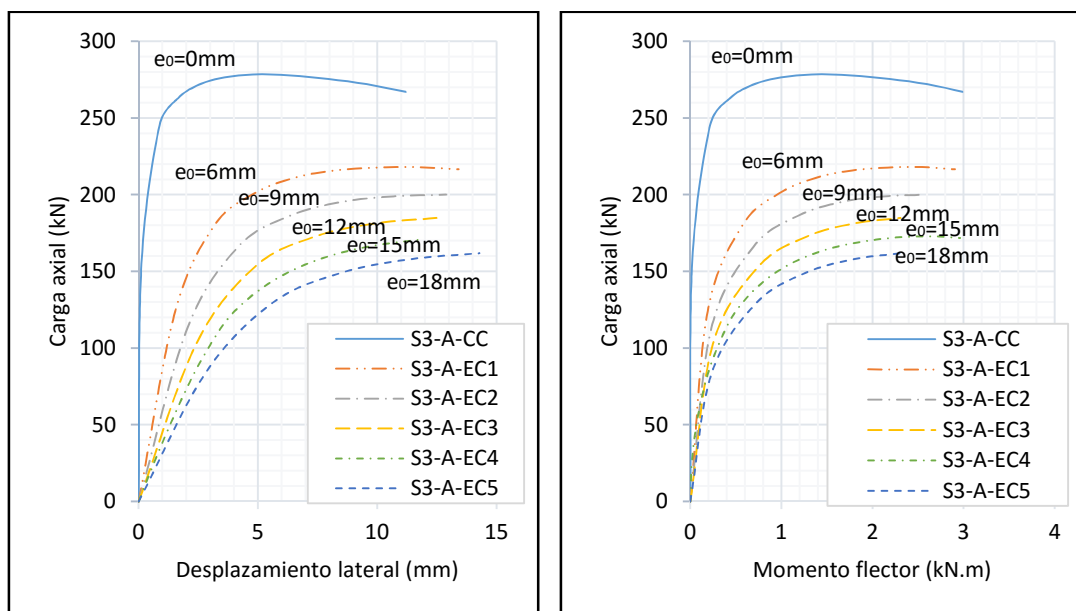
ANEXOS

Anexo 1 Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector modelos elementos finitos

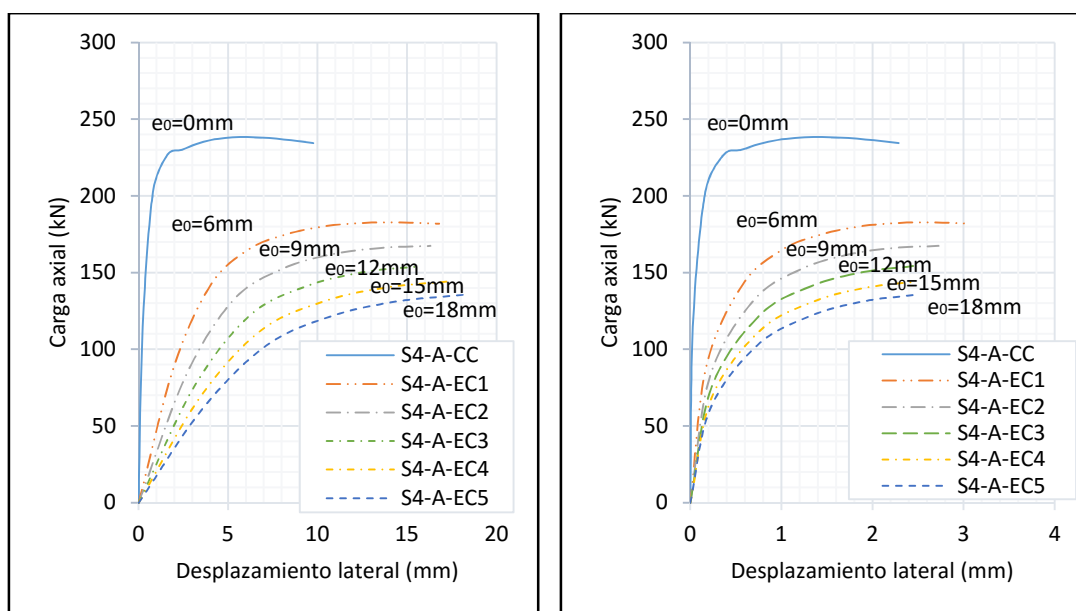
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S1-A austeníticos).



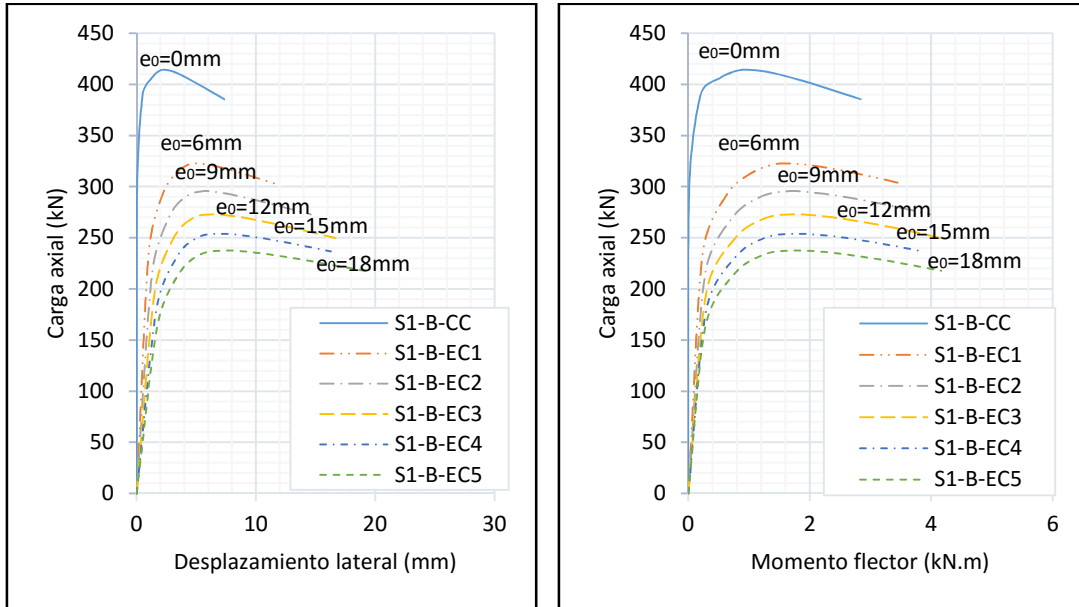
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S2-A austeníticos).



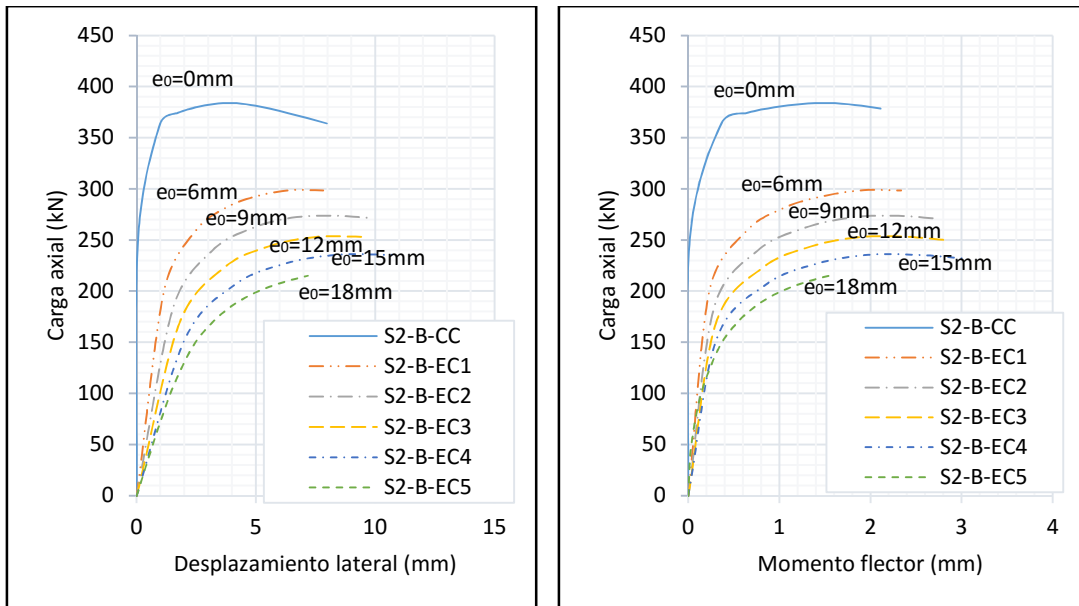
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S3-A austeníticos).



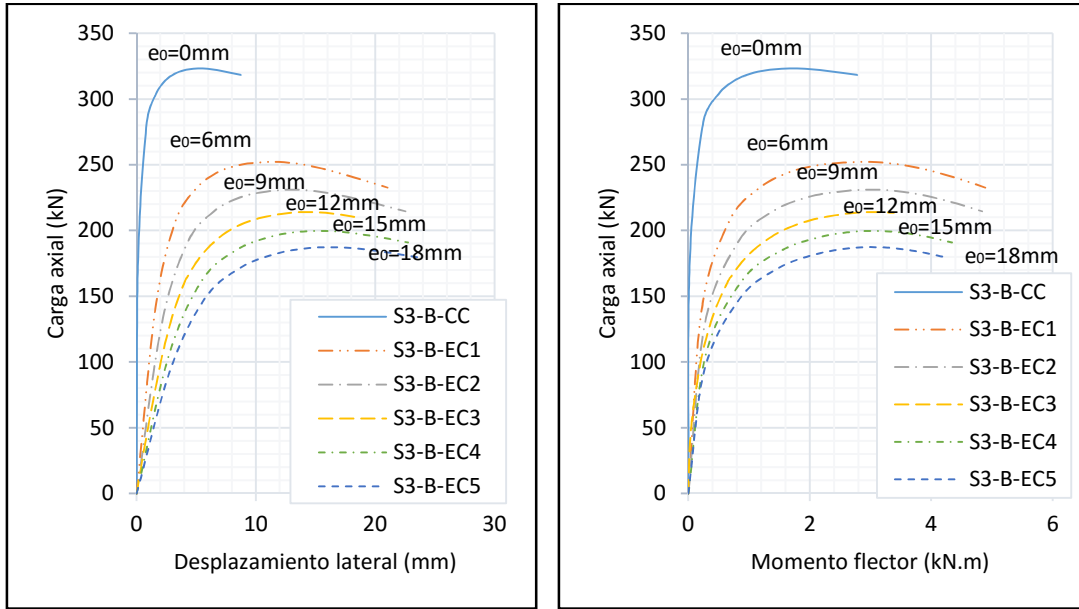
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S4-A austeníticos).



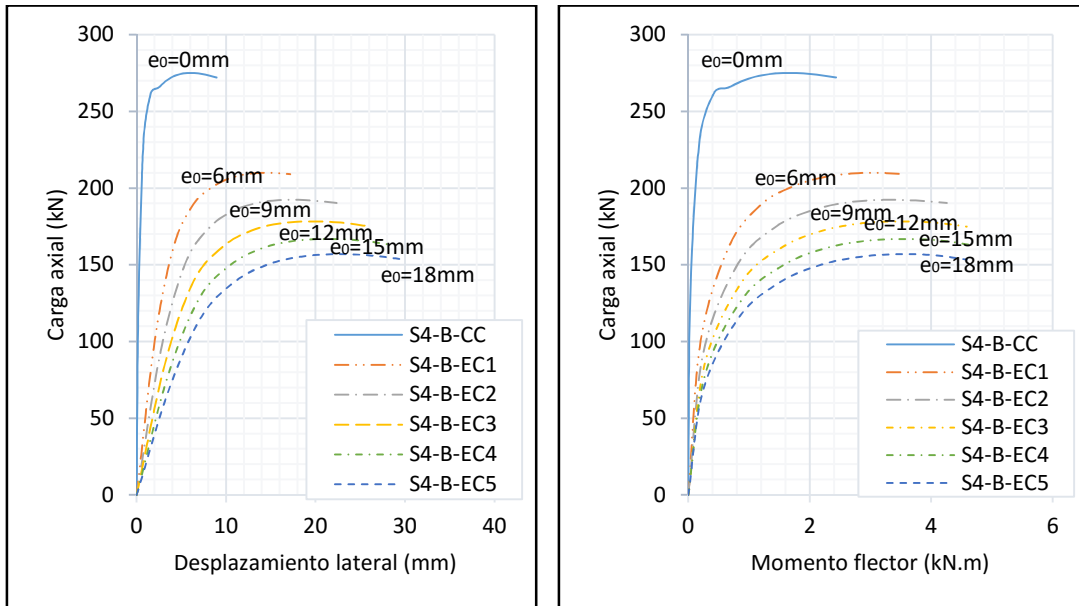
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S1-B austeníticos).



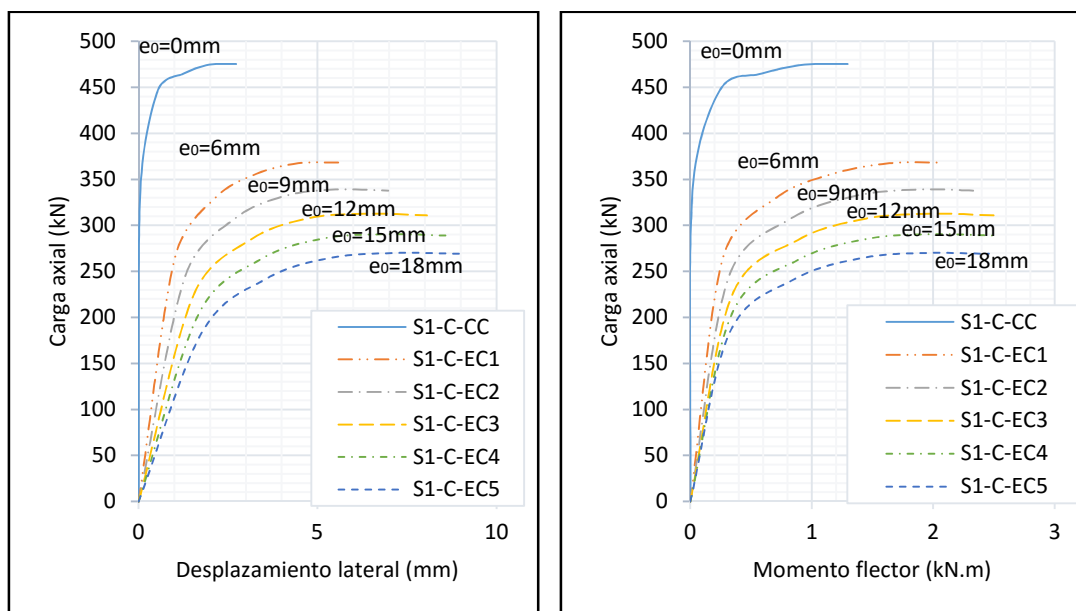
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S2-B austeníticos).



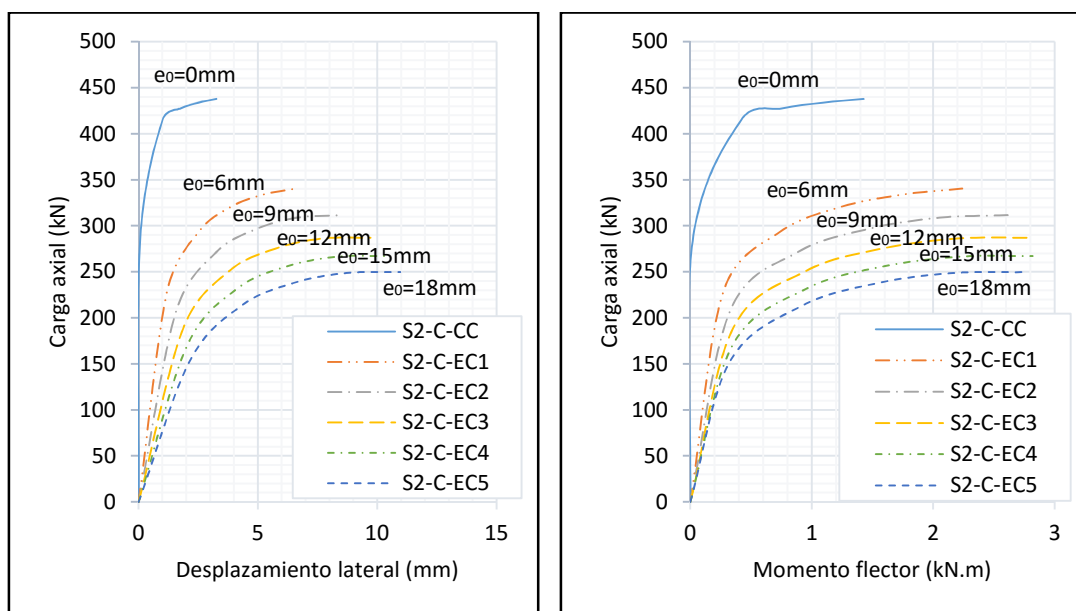
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S3-B austeníticos).



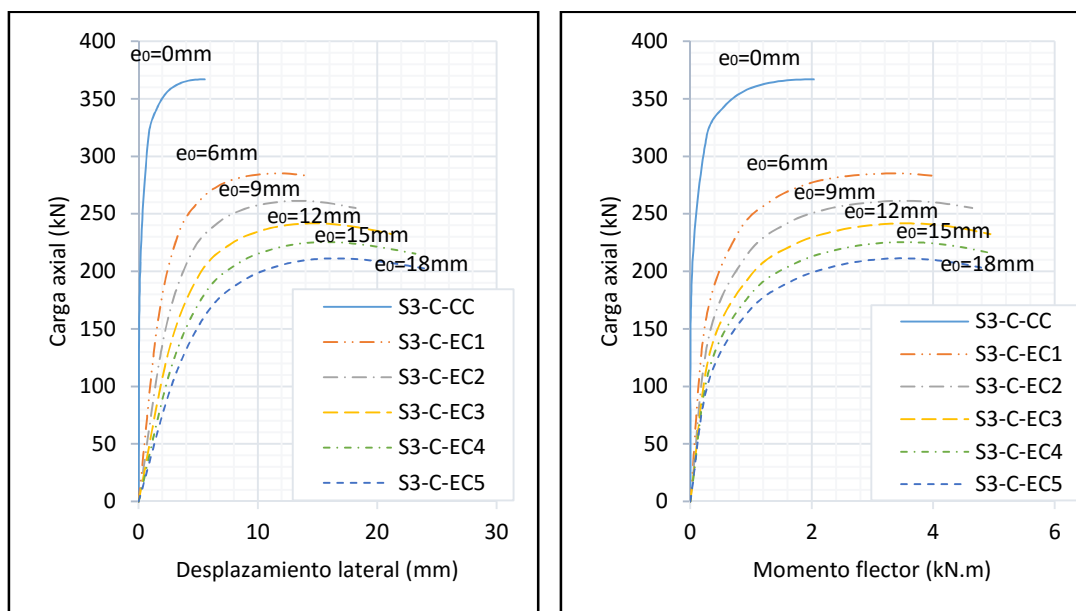
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S4-B austeníticos).



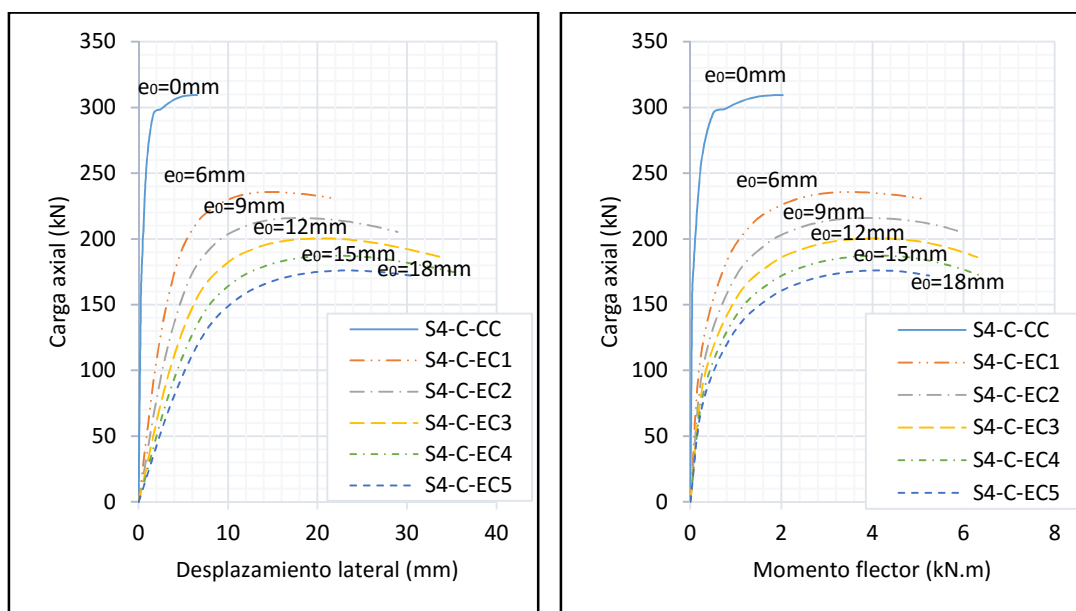
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S1-C austeníticos).



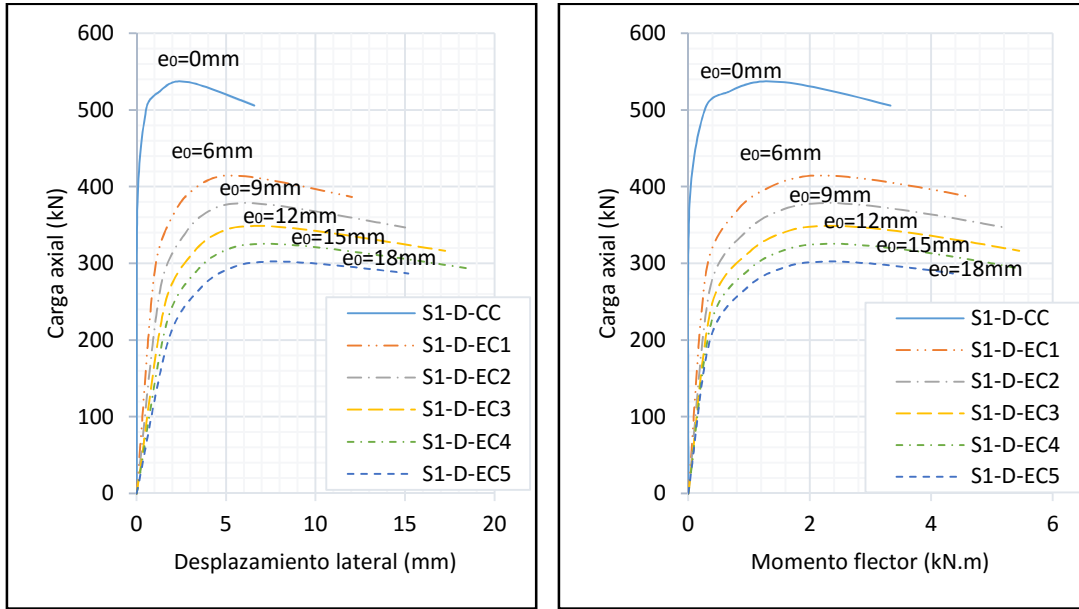
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S2-C austeníticos).



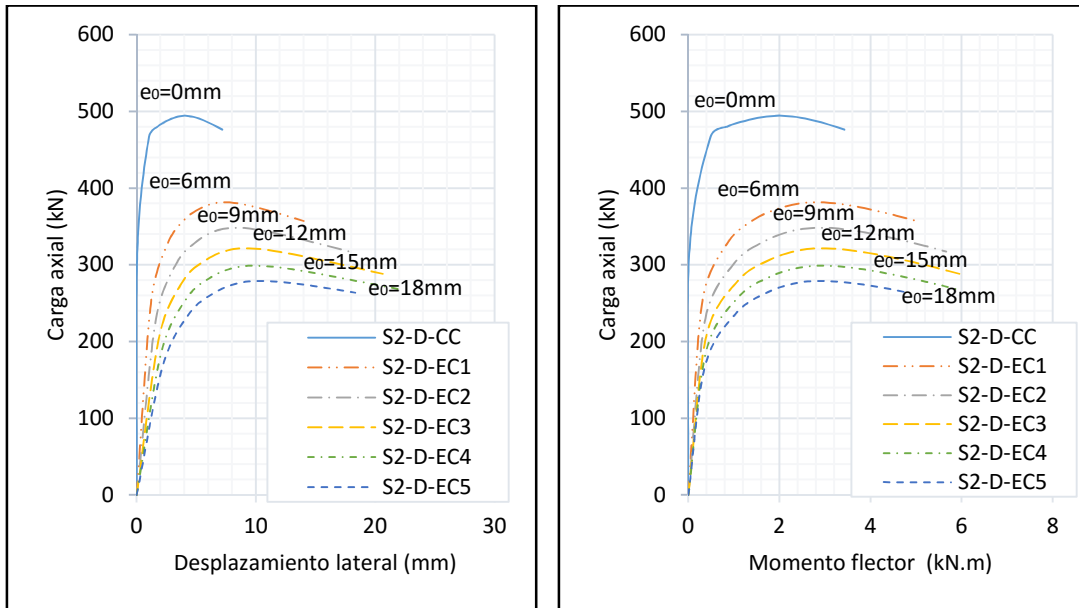
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S3-C austeníticos).



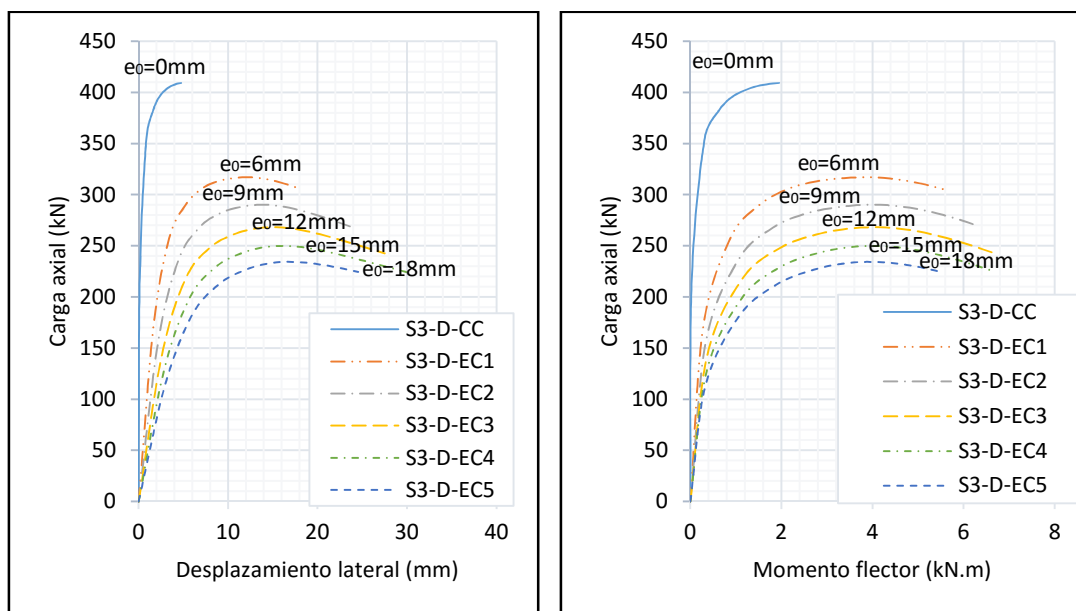
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S4-C austeníticos).



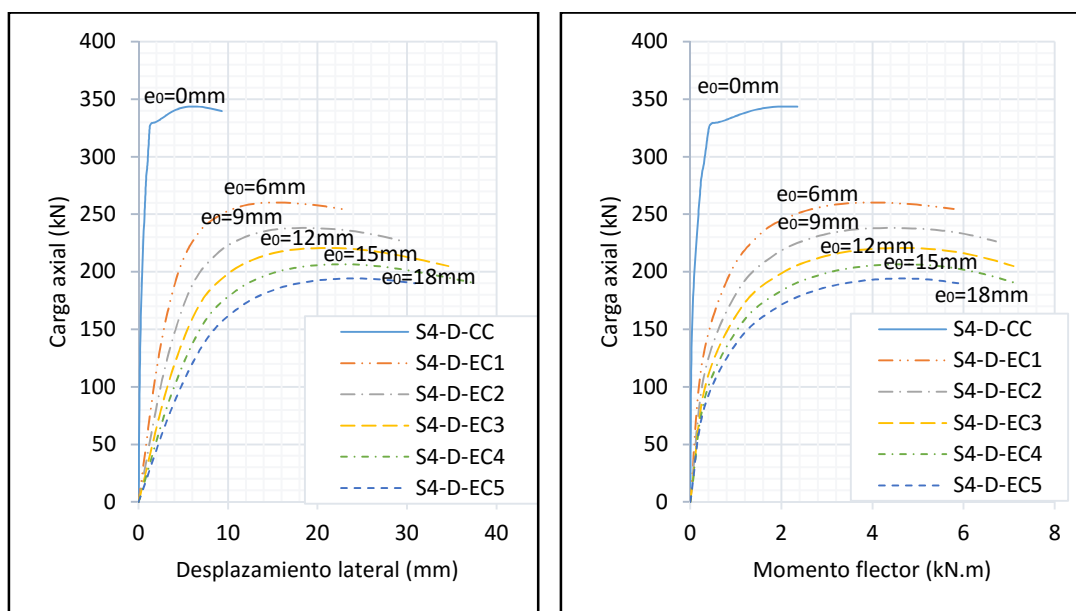
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S1-D austeníticos).



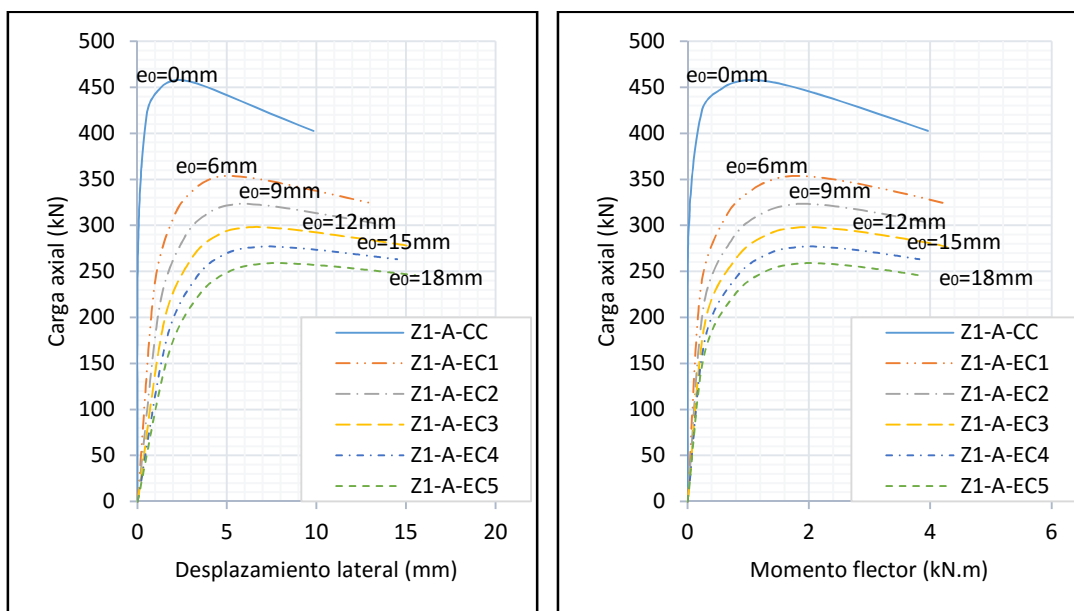
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S2-D austeníticos).



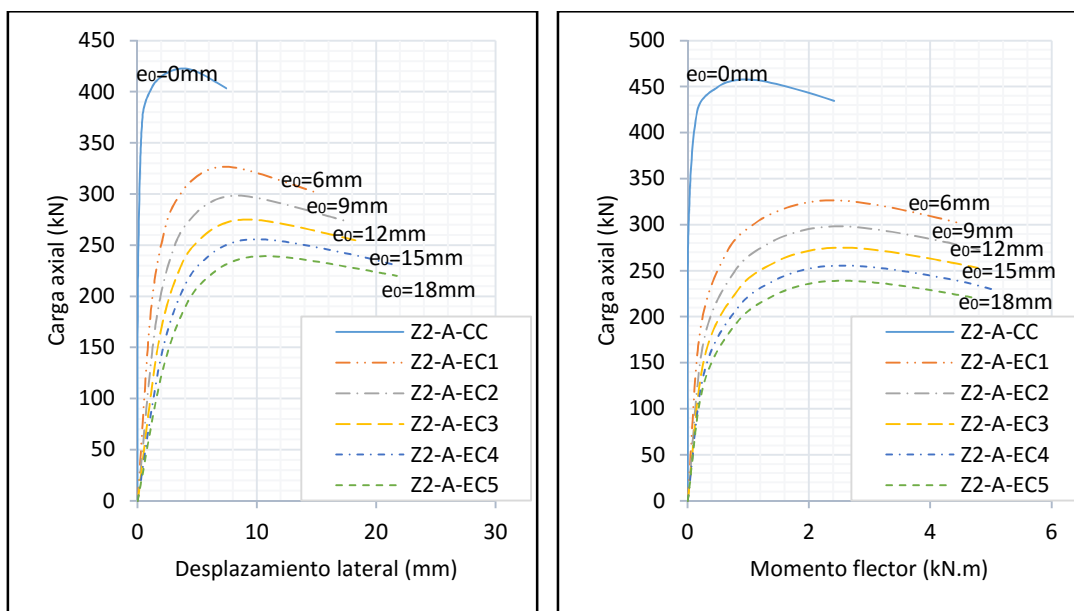
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S3-D austeníticos).



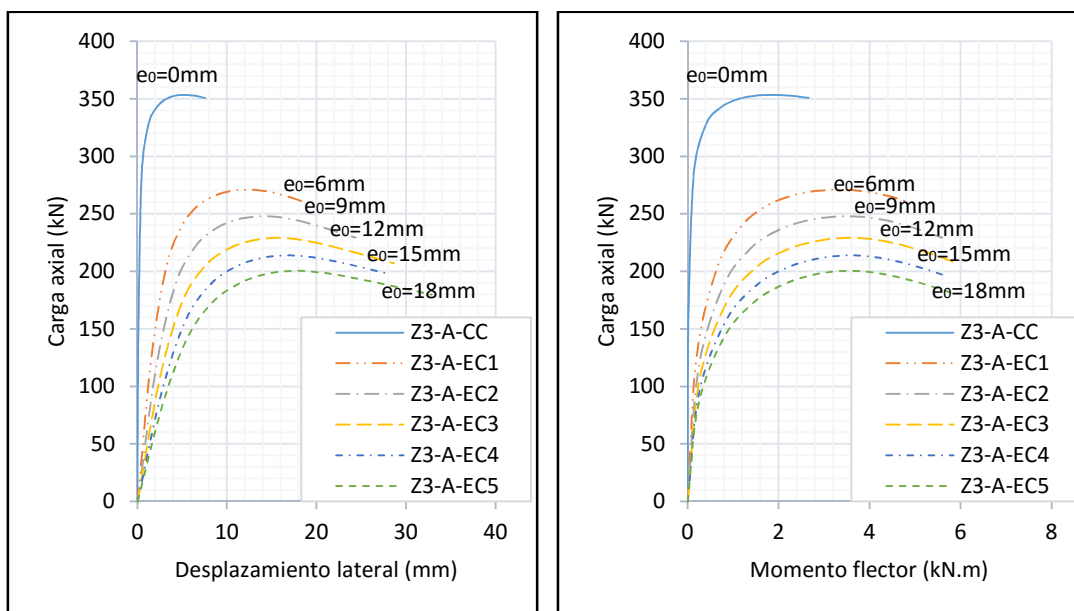
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (S4-D austeníticos).



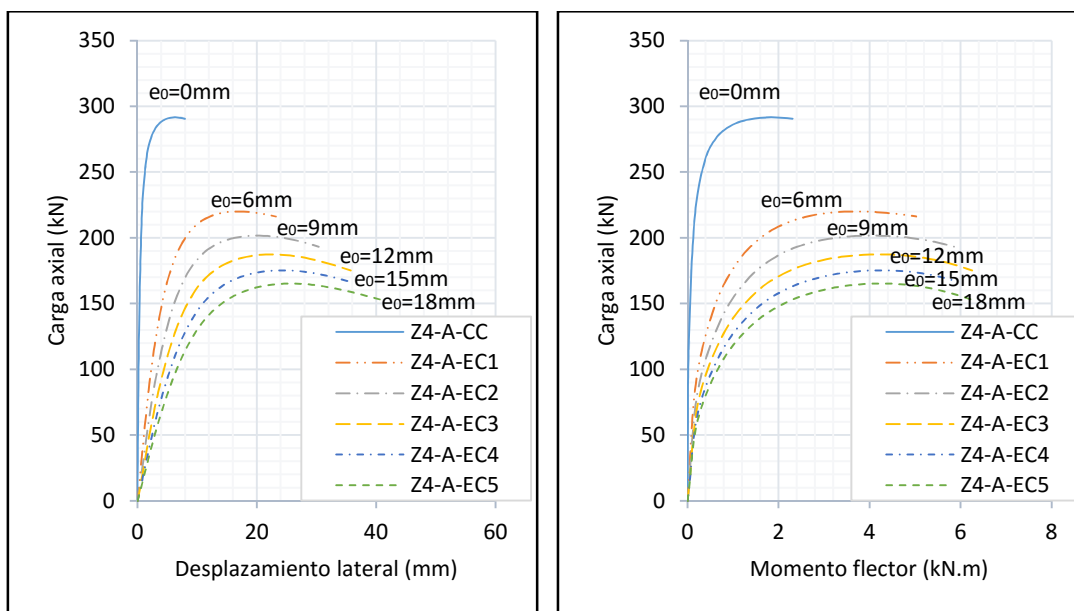
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z1-A dúplex).



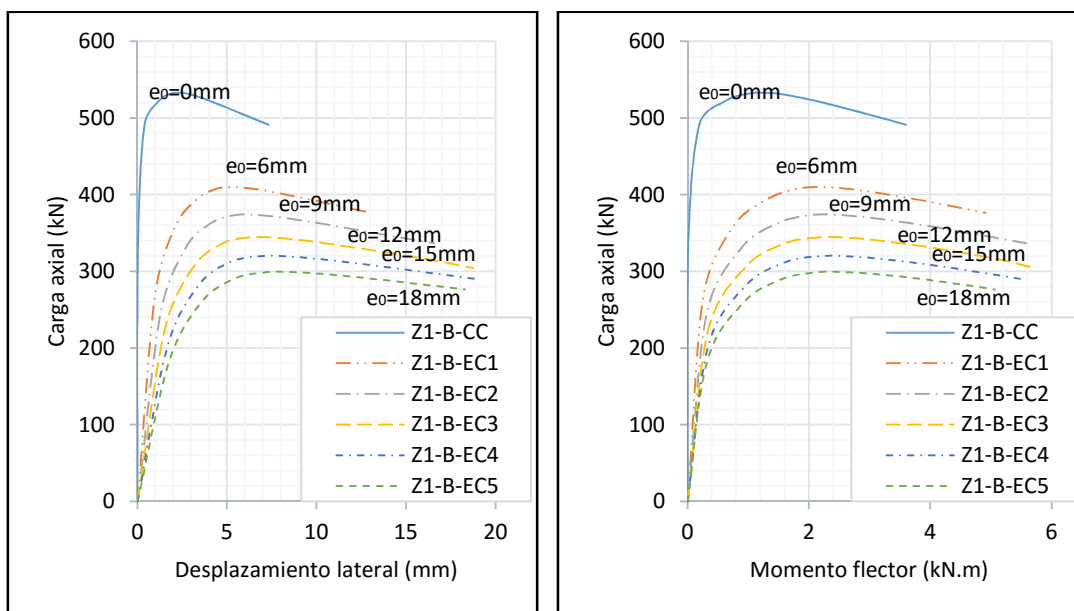
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z2-A dúplex).



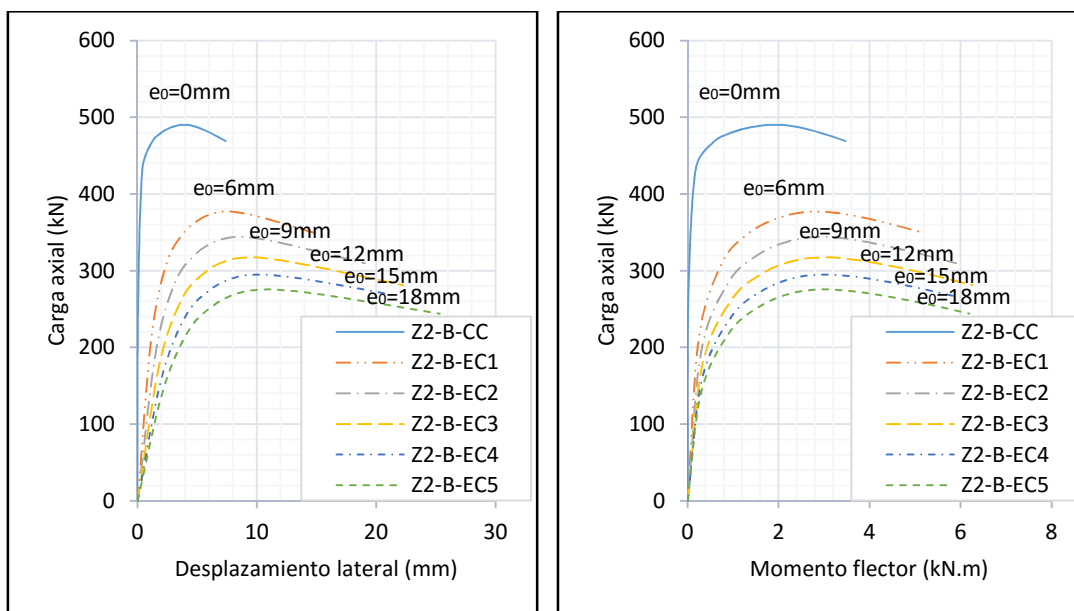
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z3-A dúplex).



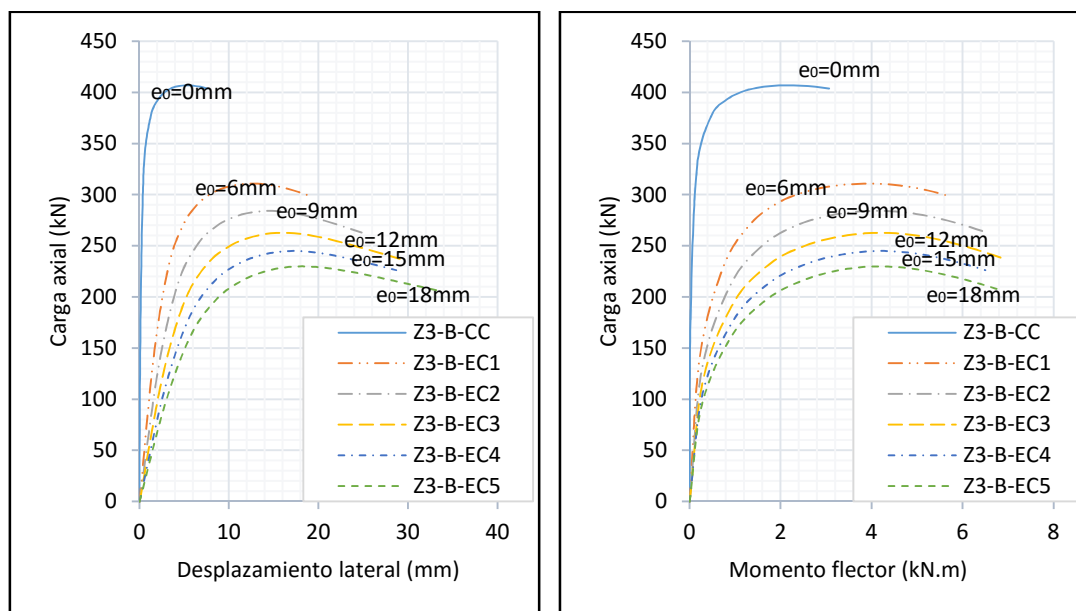
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z4-A dúplex).



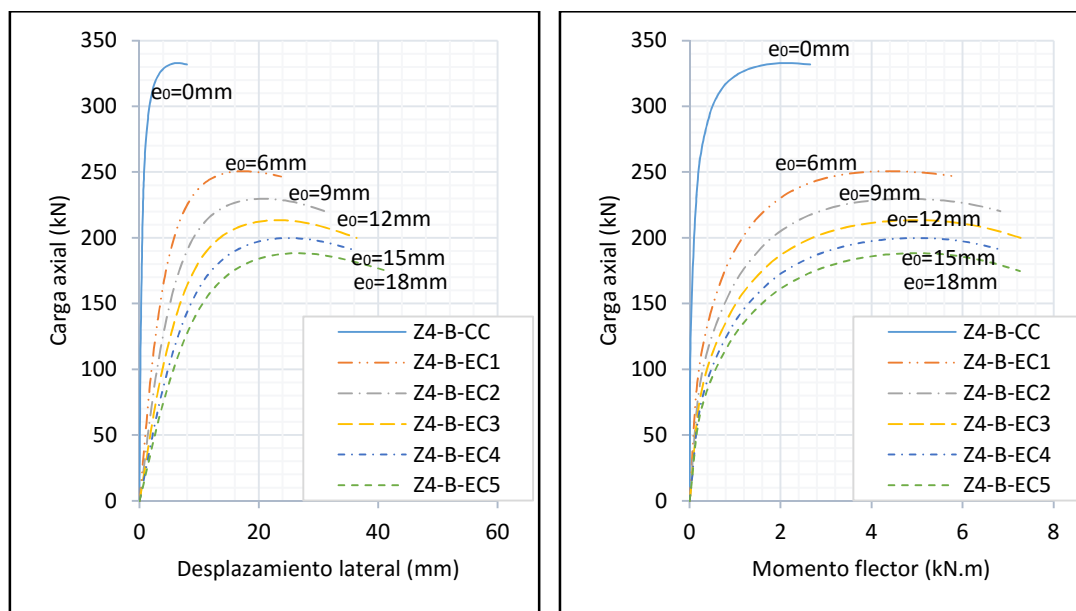
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z1-B dúplex).



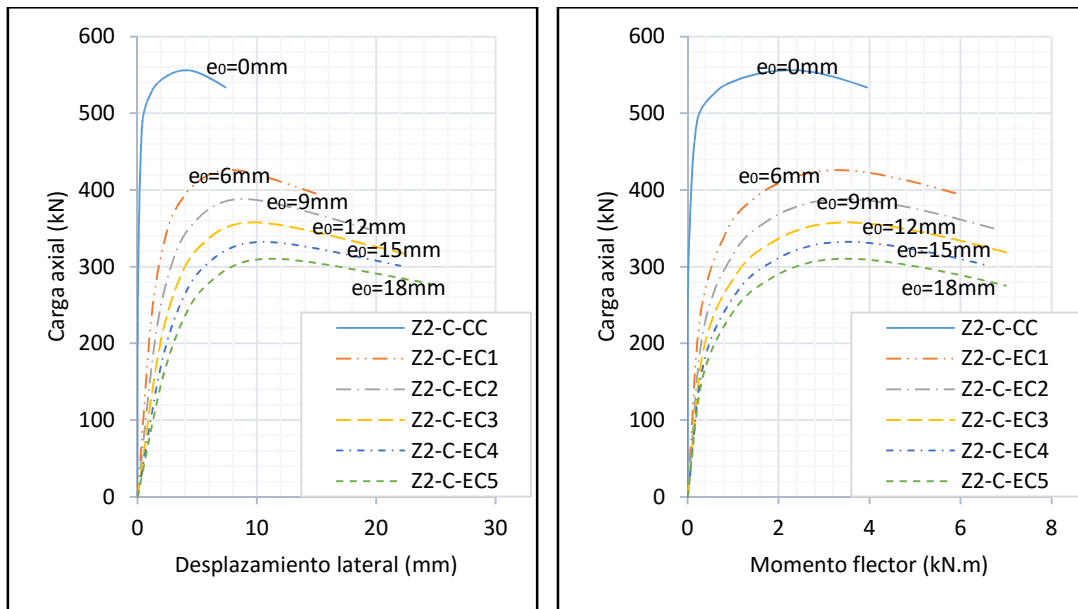
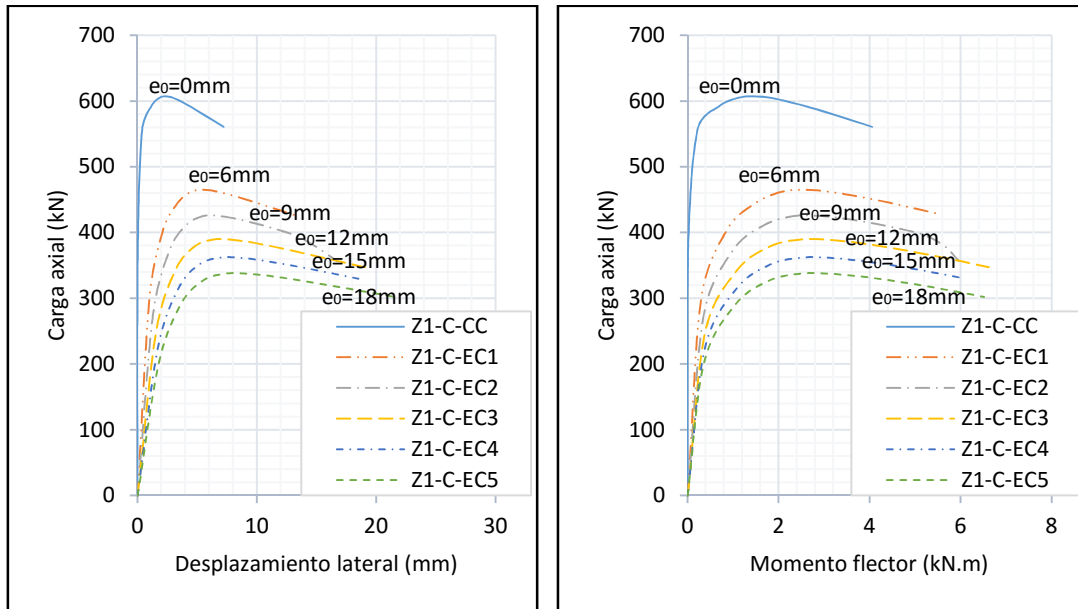
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z2-B dúplex).

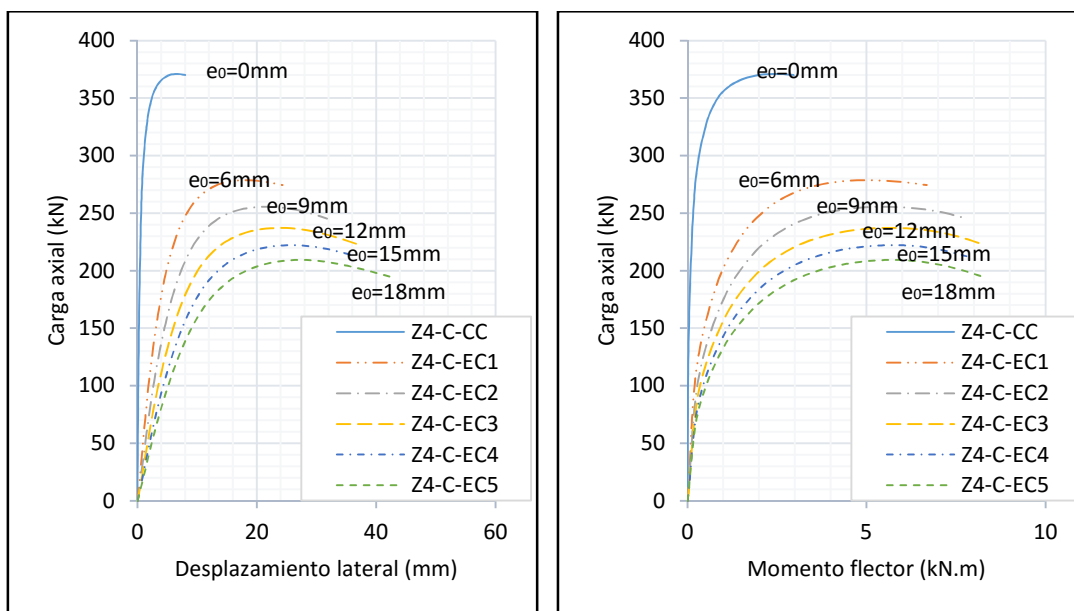
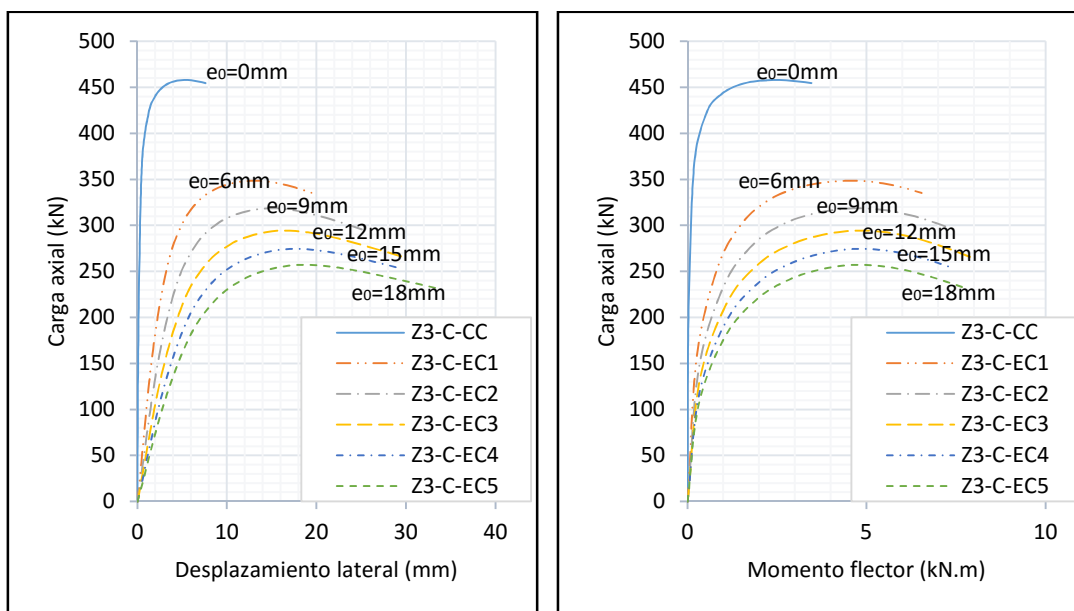


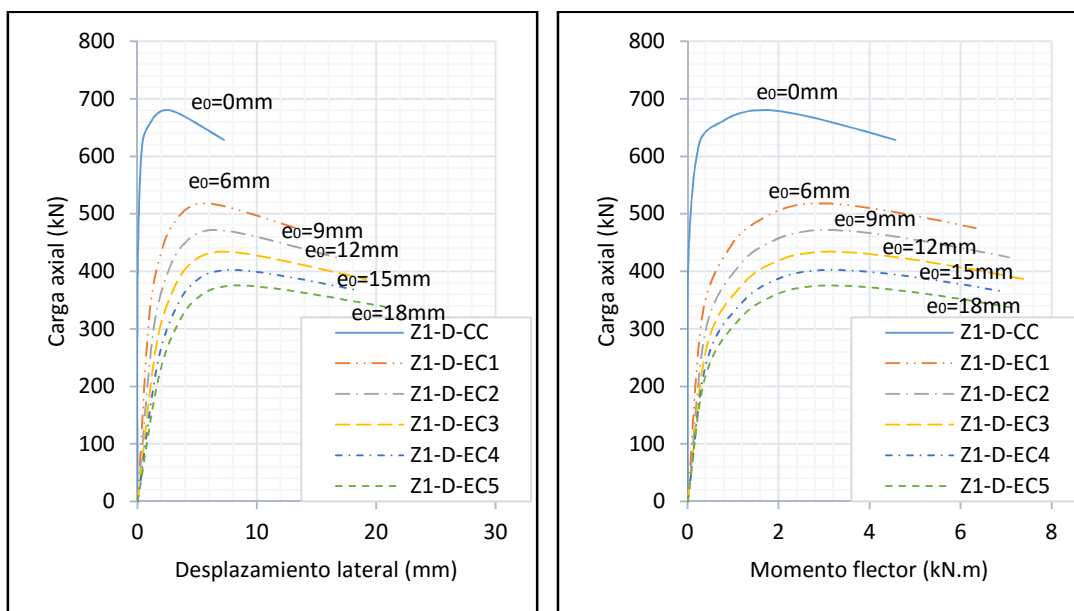
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z3-B dúplex).



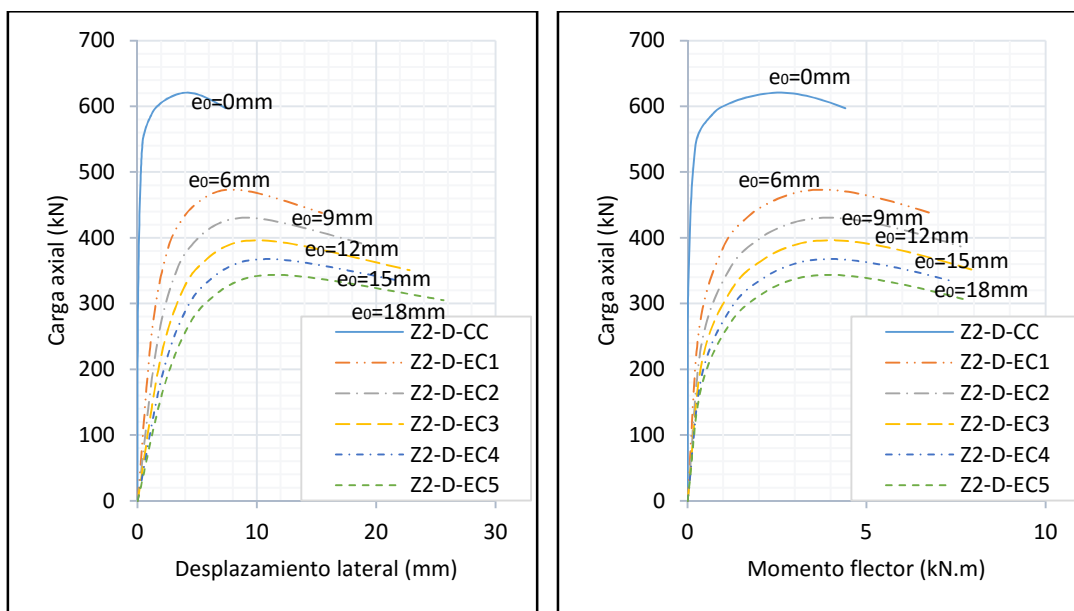
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z4-B dúplex).



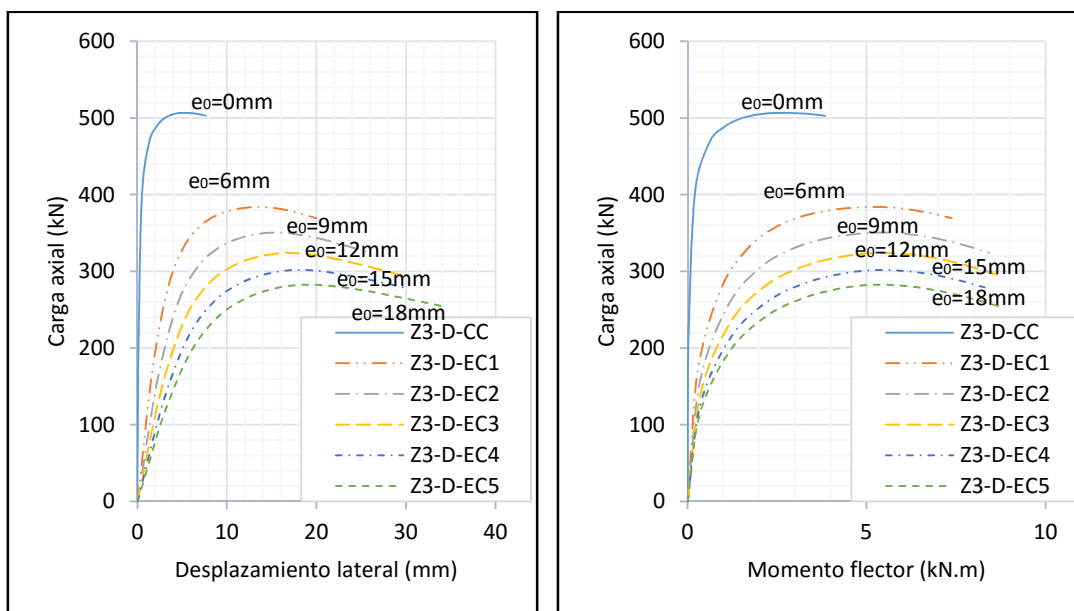




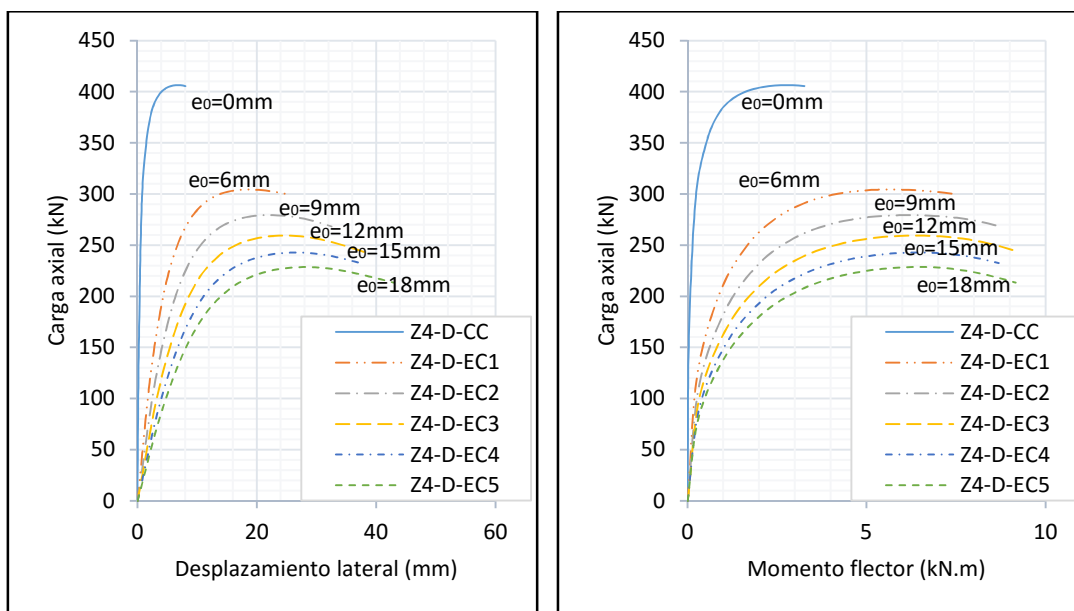
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z1-D dúplex).



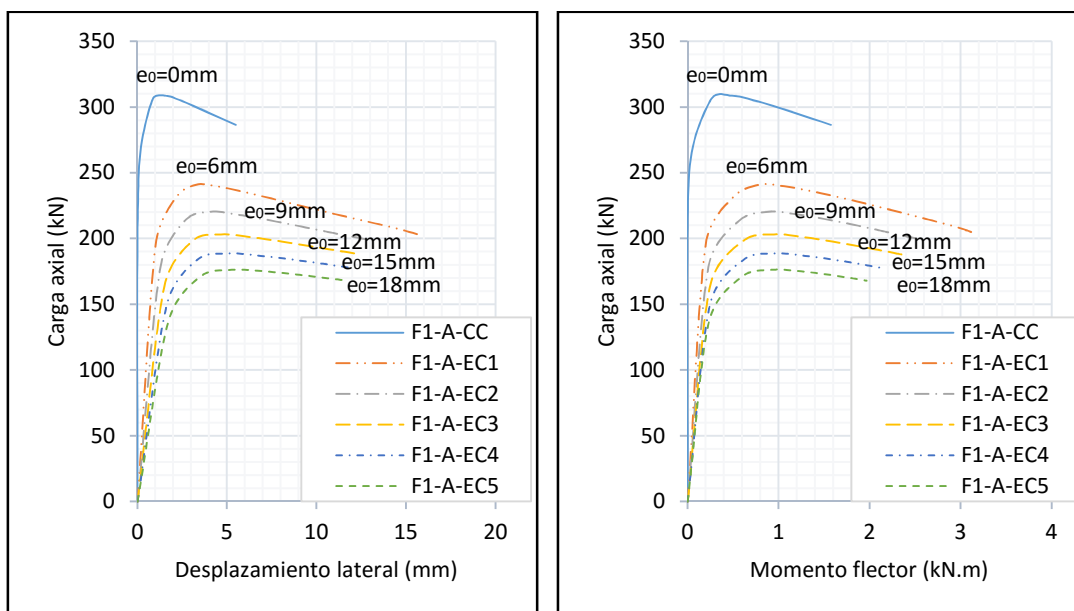
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z2-D dúplex).



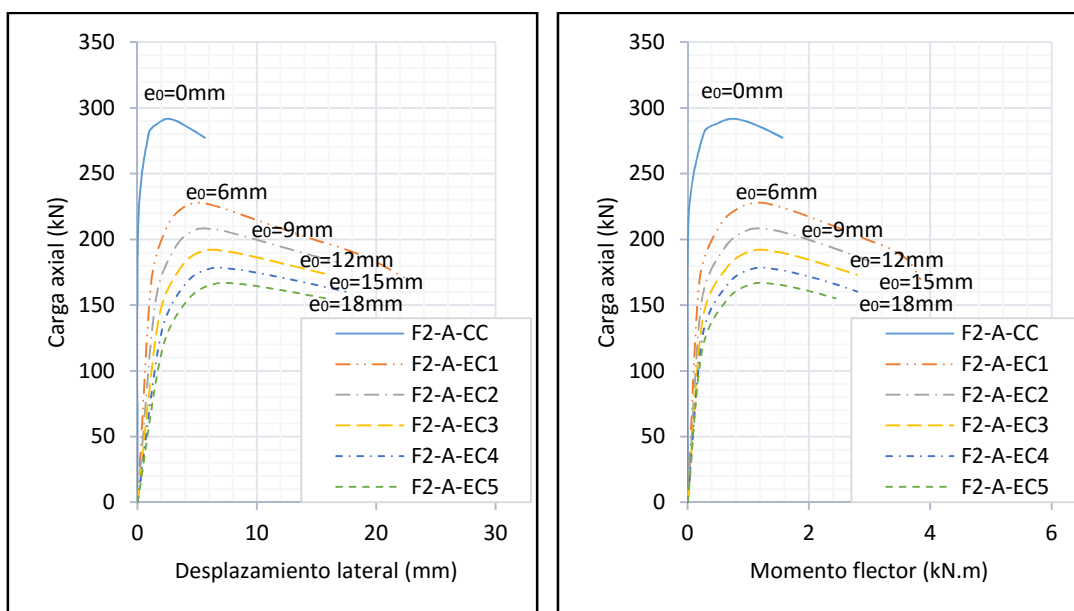
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z3-D dúplex).



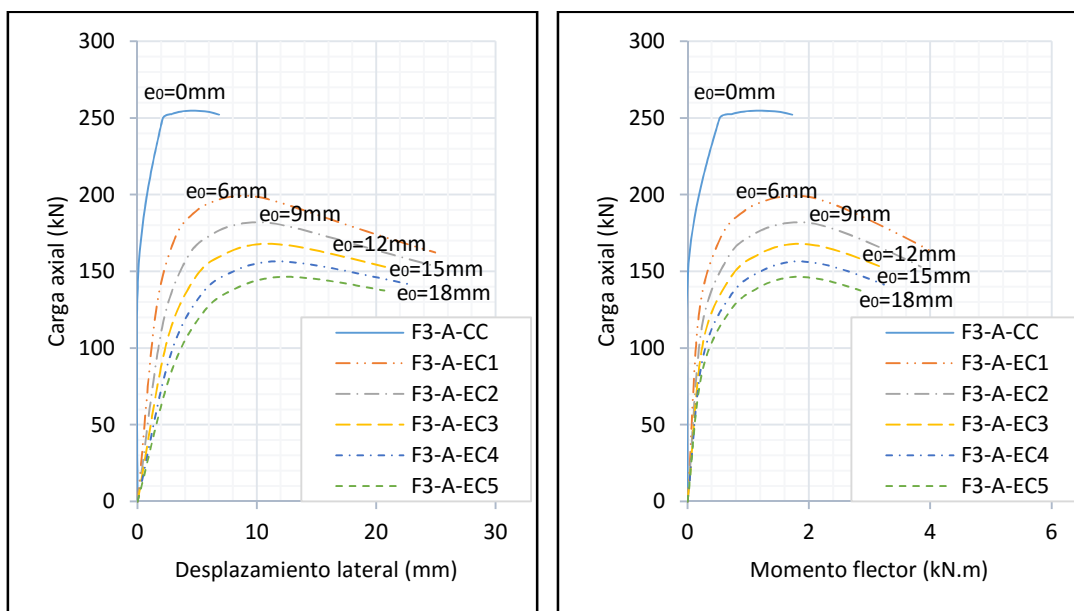
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (Z4-D dúplex).



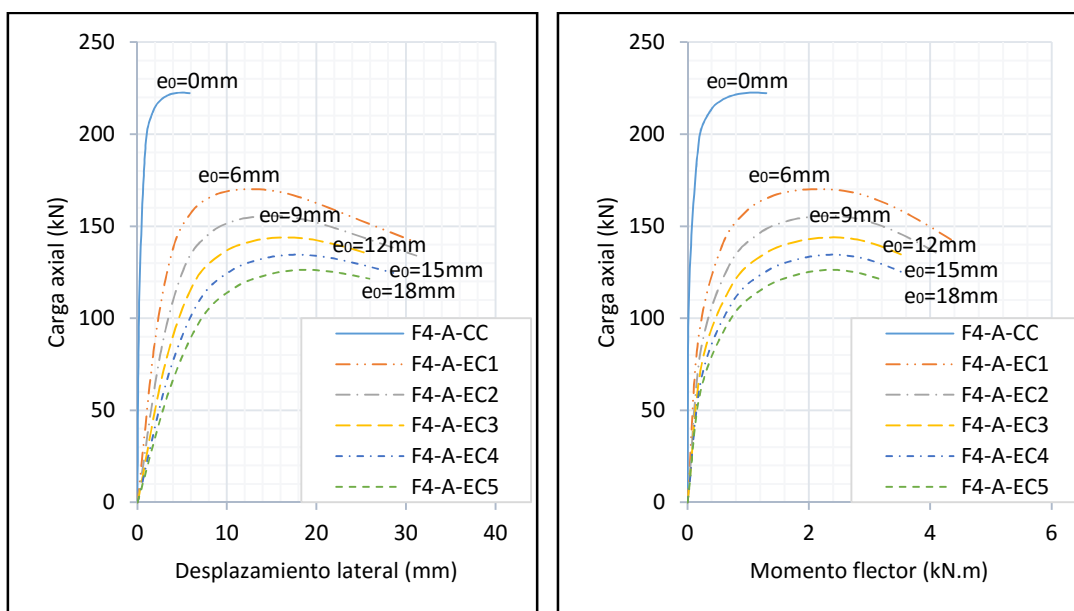
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F1-A ferrítico).



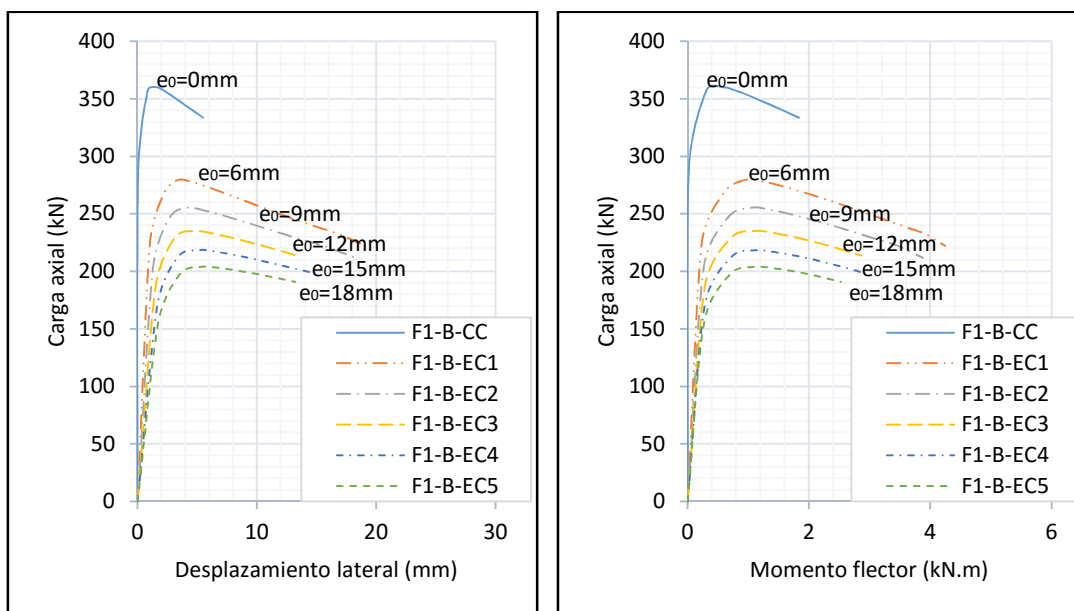
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F2-A ferrítico).



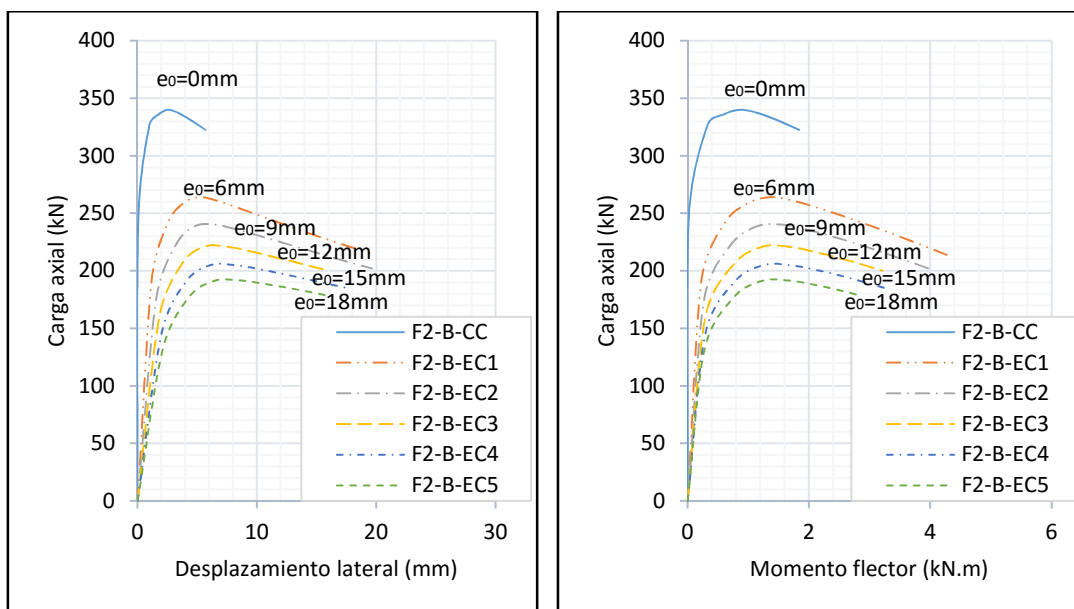
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F3-A ferrítico).



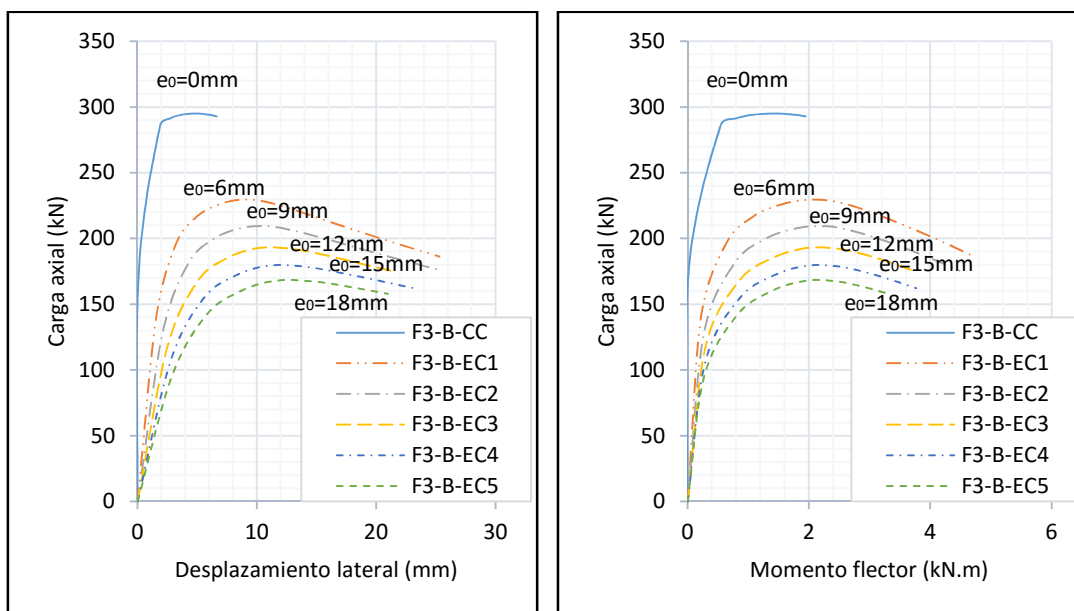
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F4-A ferrítico).



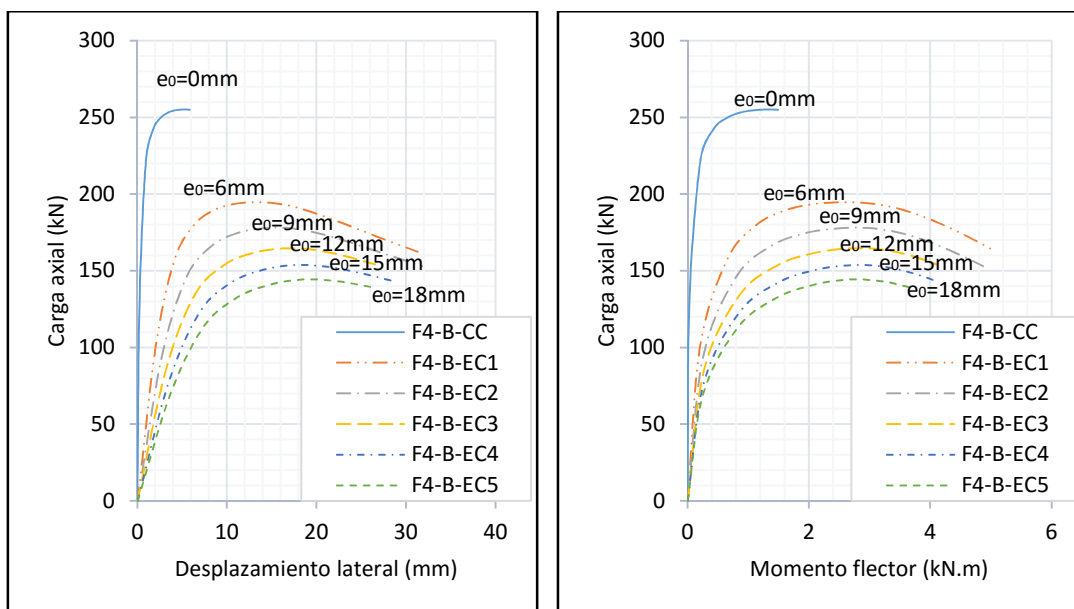
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F1-B ferrítico).



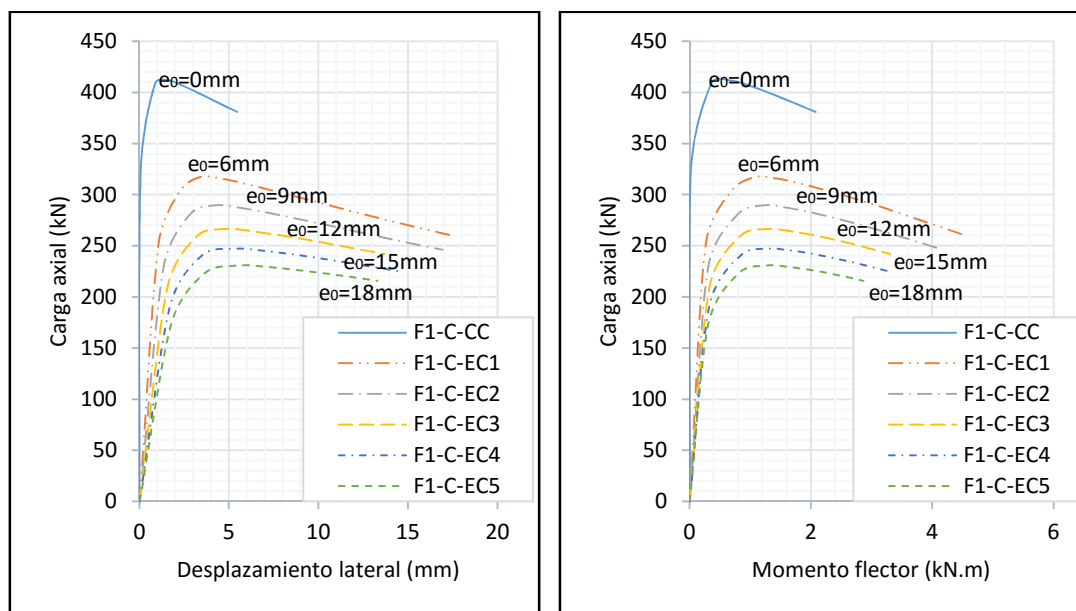
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F2-B ferrítico).



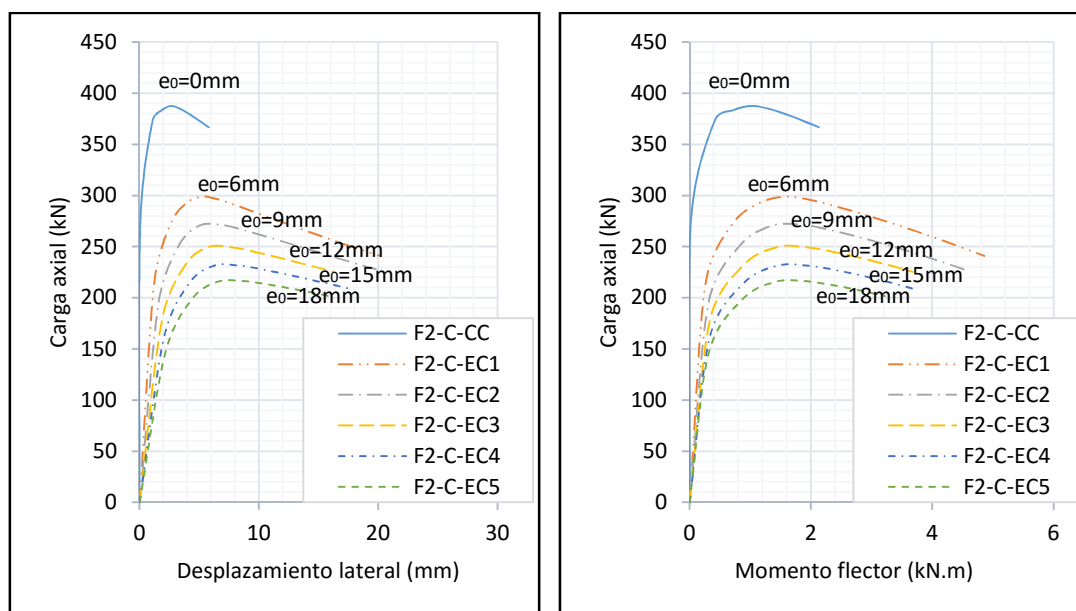
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F3-B ferrítico).



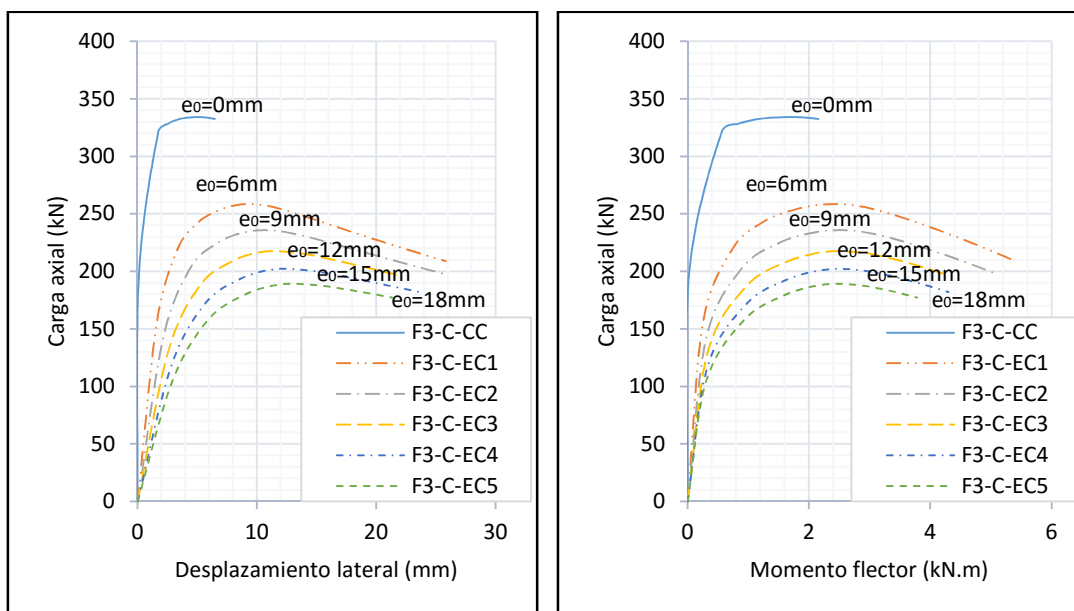
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F4-B ferrítico).



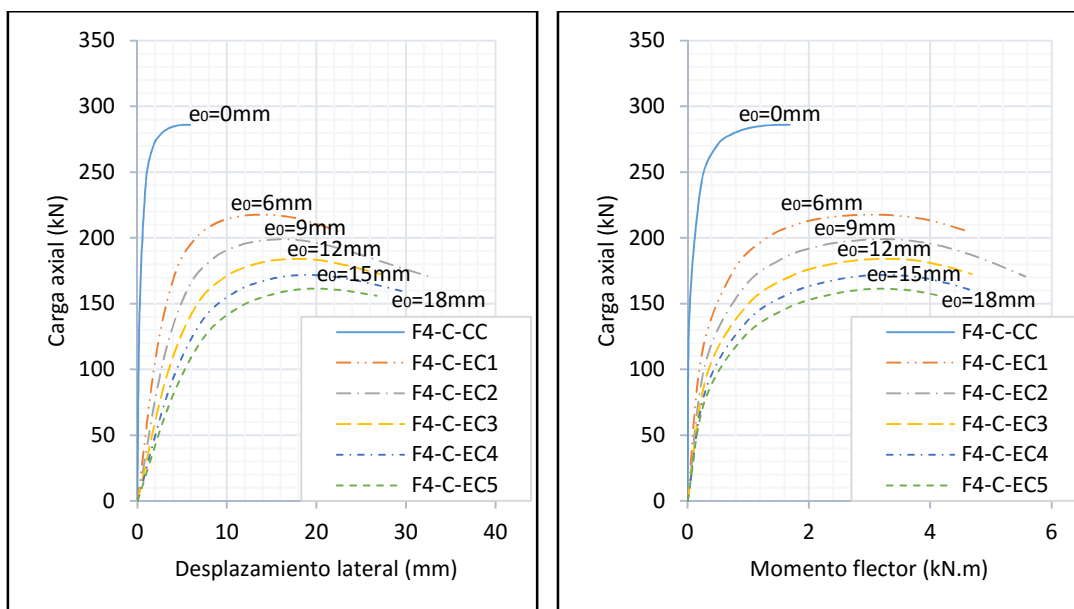
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F1-C ferrítico).



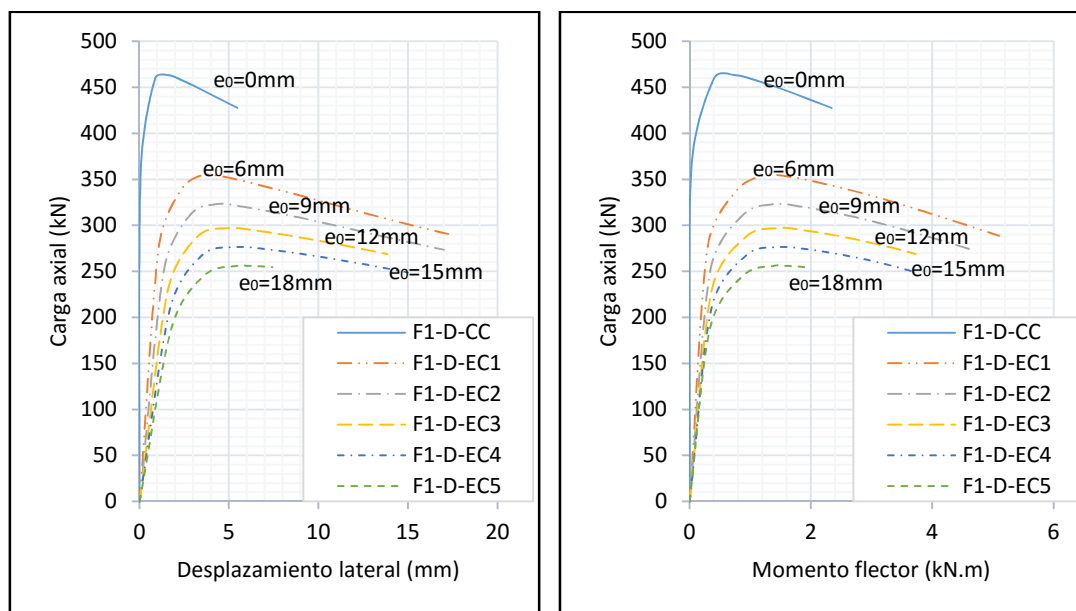
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F2-C ferrítico).



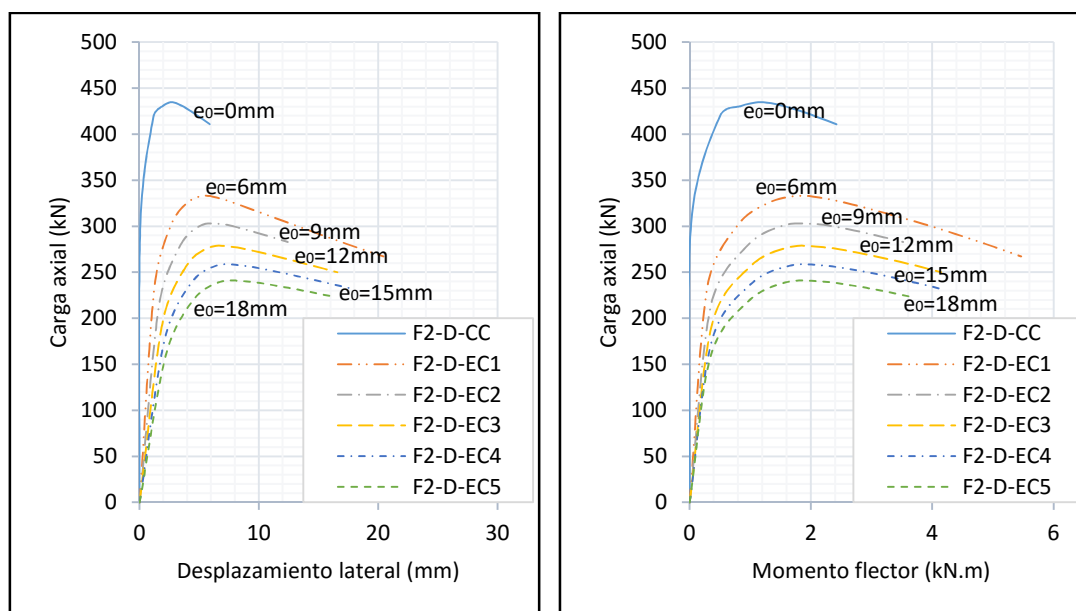
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F3-C ferrítico).



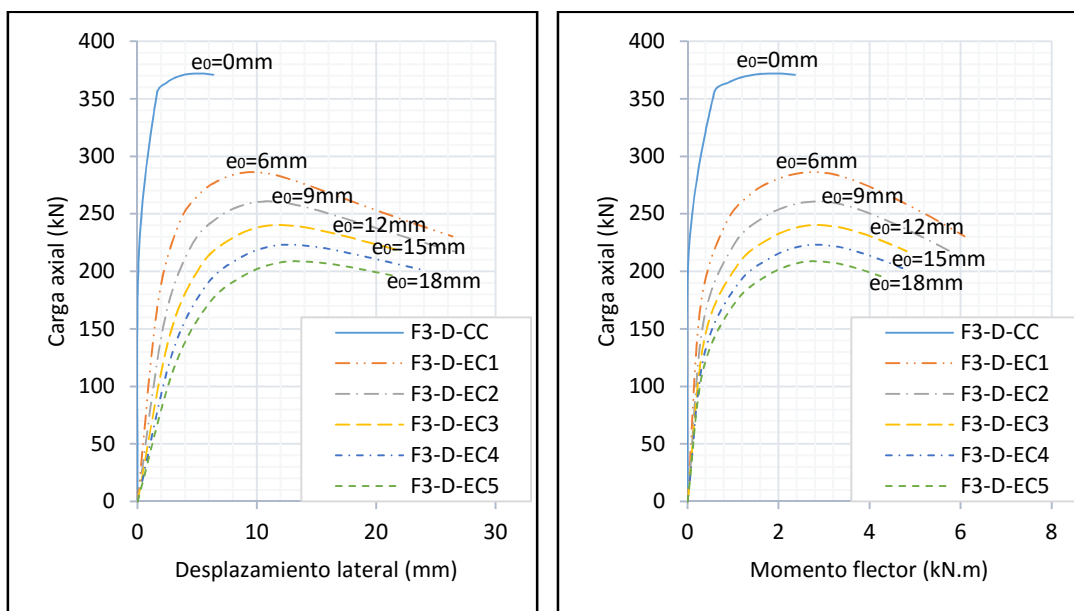
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F4-C ferrítico).



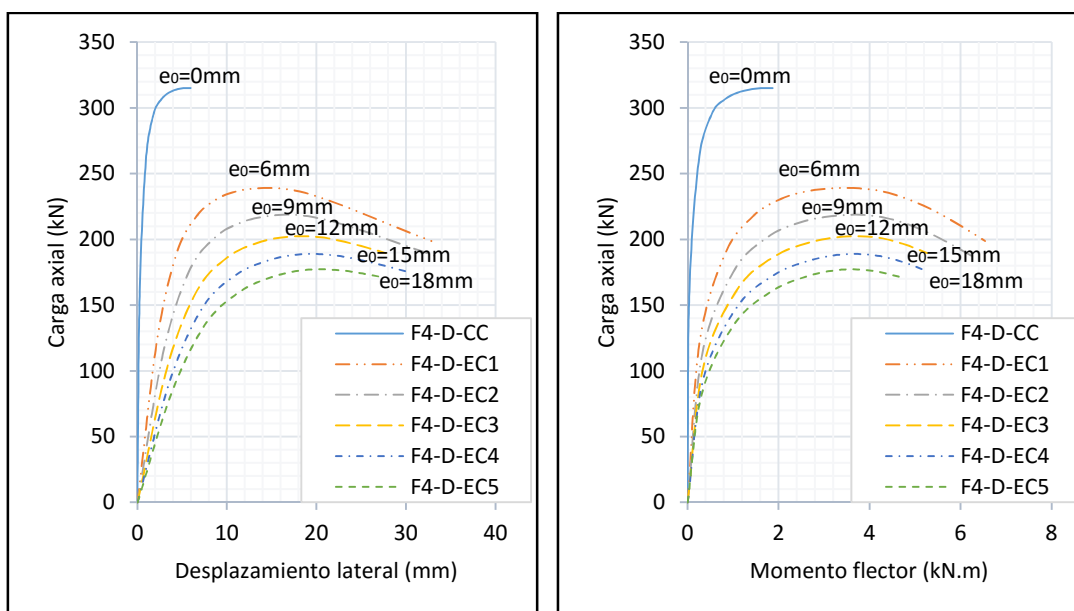
Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F1-D ferrítico).



Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F2-D ferrítico).



Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F3-D ferrítico).



Curvas carga axial-desplazamiento lateral y carga axial-momento flector (F4-D ferrítico).